

CAPITULO 7

DESINFECCIÓN

7.1 Introducción

El objetivo primordial de los procesos de desinfección, como parte del tratamiento de aguas residuales es la desactivación o destrucción de los microorganismos patógenos que puedan encontrarse en el agua residual municipal. No todos los organismos se destruyen durante el proceso, a diferencia de la esterilización, proceso que conduce a la destrucción total de los organismos.

En el tratamiento de aguas residuales, las tres categorías de organismos entéricos de origen humano de mayores consecuencias en la producción de enfermedades son las bacterias, los virus y los quistes amibianos. Es de suma importancia que las aguas residuales sean tratadas adecuadamente antes de realizarse las actividades de desinfección para que la acción de cualquier desinfectante sea eficaz.

En la Tabla (7.1) se muestran los microorganismos que más comúnmente se pueden encontrar en las aguas residuales domésticas, así como las enfermedades que éstas pueden producir.

7.2 Análisis de los factores que influyen en la acción de los desinfectantes

7.2.1 Tiempo de contacto

Es la variable más importante en el proceso de desinfección. Se ha observado que, para una concentración dada de desinfectante, la mortalidad de los microorganismos aumenta cuanto mayor sea el tiempo de contacto. Esto se puede observar en forma diferencial en la ley de Chick-Watson:

$$\frac{dN}{dt} = -kCN \quad (7.1)$$

donde N = número de organismos vivos en el instante t .

C = concentración de desinfectante, masa / volumen.

t = tiempo.

k = constante, tiempo⁻¹.

Si N_0 es el número de organismos en el instante inicial, $t = 0$, la ecuación anterior se puede integrar para obtener:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t kC dt \quad (7.2)$$

resolviendo:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -kCt \quad (7.3)$$

o

$$\frac{N}{N_0} = e^{-kCt} \quad (7.4)$$

Tabla 7.1 Microorganismos comúnmente encontrados en el agua residual municipal y sus correspondientes enfermedades. (EPA, 1999)

ORGANISMO	ENFERMEDAD CAUSADA
Bacterias	
<i>Escherichia coli</i> (enterotoxígeno)	Gastroenteritis
<i>Leptospira</i> (spp.)	Leptospirosis
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea
<i>Salmonella</i> (2,100 serotipos)	Salmonelosis
<i>Shigella</i> (4 spp.)	Shigellosis (disentería bacilar)
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
Protoz oarios	
<i>Balantidium coli</i>	Balantidiasis
<i>Cryptosporidium parvum</i>	Cryptosporidiasis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis (disentería amoebíca)
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis
Helmintos	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis
<i>T. solium</i>	Teniasis
<i>Trichuris trichiura</i>	Tricuriasis
Viruses	
Enterovirus (72 tipos; por ejemplo: virus <i>echo</i> y <i>coxsackie</i> del polio)	Gastroenteritis, anomalías del corazón y meningitis.
Hepatitis A	Hepatitis de tipo infeccioso
Agente de Norwalk	Gastroenteritis
<i>Rotavirus</i>	Gastroenteritis

Las desviaciones respecto a esta ley son frecuentes. Se ha comprobado que la cinética de inactivación de los microorganismos (relación entre N / N_0 y Ct) no siempre sigue la ecuación propuesta por Chick-Watson. Algunas desviaciones típicas se muestran en la figura 7.1.

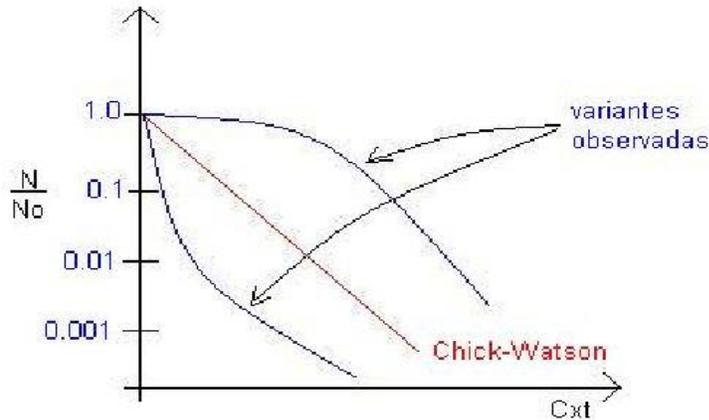


Figura 7.1 Desviaciones típicas de los microorganismos con respecto a la ley Chick-Watson.

7.2.2 Tipo y concentración del agente químico

Se ha comprobado que la efectividad del desinfectante químico está relacionada con su concentración. El efecto de la concentración se ha formulado empíricamente con la siguiente expresión:

$$C^n t_p = \text{constante} \quad (7.5)$$

donde C = concentración de desinfectante.

n = constante.

t_p = tiempo necesario para alcanzar un porcentaje de mortalidad constante.

Las constantes de la ecuación anterior se pueden determinar representando la concentración frente al tiempo necesario para alcanzar un porcentaje dado de mortalidad en un papel doblemente logarítmico. El producto ($C \times t$) se conoce como “dosis” de desinfección y, de acuerdo al supuesto anterior, la aplicación de cualquier combinación de C y t que resulte en un valor constante tendrá asociada un nivel de inactivación microbiana único. Esto se ha llamado comúnmente “Concepto $C \times t$ ” en el campo de la desinfección de agua.

7.3 Desinfección con cloro

7.3.1 Cloro y compuestos del cloro

El cloro puede ser usado como desinfectante en forma de gas comprimido bajo presión o en soluciones de agua, soluciones de hipoclorito de sodio, o de hipoclorito de calcio sólido. Las tres formas son químicamente equivalentes gracias al rápido equilibrio que existe entre el gas molecular disuelto y los productos disociados de compuestos de hipoclorito.

El cloro elemental (Cl_2) es un gas denso que, cuando está sujeto a presiones en exceso de su presión de vapor, se condensa a líquido con la liberación de calor y con ello reduce su

volumen específico aproximadamente 450 veces. Por lo tanto, las cargas comerciales de cloro están hechas en tanques presurizados para reducir el volumen del transporte.

La concentración de hipoclorito (o cualquier otro desinfectante clorado) puede ser expresado como cloro disponible determinando la equivalente cantidad electroquímica de Cl_2 para ese compuesto. En la siguiente ecuación, una molécula de cloro elemental es capaz de reaccionar con dos electrones para formar cloro inerte:



De la siguiente reacción, un mol de hipoclorito (OCl^-) puede reaccionar con dos electrones para formar cloro:



Por lo tanto, un mol de hipoclorito es electroquímicamente equivalente a una molécula de cloro elemental, y se puede decir que contiene 70.91 gramos de cloro disponible (idéntico al peso molecular del Cl_2 .)

El hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) y el hipoclorito de sodio (NaOCl) contienen dos moles y un mol de hipoclorito por mol de químico, respectivamente, por consiguiente se obtiene como resultado 141.8 gramos y 70.91 gramos de cloro disponible por mol, respectivamente. El peso molecular del $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ y del NaOCl son, 143 y 74.5 respectivamente, entonces las

preparaciones puras de los dos compuestos contienen el 99.2 y el 95.8 por ciento de cloro disponible del peso, por lo tanto, ambos son muy efectivos para suministrar cloro para propósitos de desinfección.

7.3.2 Reacciones del cloro en agua

Cuando el cloro gas se absorbe en agua ocurren dos reacciones: hidrólisis e ionización. La hidrólisis se puede definir de la siguiente forma:



La constante de Henry K_H para esta reacción es:

$$K = \frac{[\text{HOCl}][\text{H}^+][\text{Cl}^-]}{[\text{Cl}_2]} \approx 4.5 \times 10^{-4} \text{ a } 25^\circ\text{C} \quad (7.9)$$

La disolución en agua de grandes cantidades de cloro. Debido a su elevada solubilidad es posible la disolución en agua de grandes cantidades de cloro.

La ionización se puede describir de la siguiente manera:



La constante de la reacción de ionización es:

$$K_i = \frac{[H^+][OCl^-]}{[HOCl]} = 2.9 \times 10^{-8} \quad \text{a } 25^\circ\text{C} \quad (7.11)$$

A la cantidad total de Cl_2 , OCl^- y $HOCl$ presente en el agua se denomina “cloro libre.” La distribución relativa de estas dos especies (que se muestra en la siguiente gráfica) es muy importante, ya que la capacidad de destrucción de organismos del $HOCl$ es entre 40 a 80 veces mayor a la del OCl^- . La distribución porcentual de $HOCl$ en función del pH se puede estimar a partir de la Figura 7.2.

$$\frac{[HOCl]}{[HOCl] + [OCl^-]} = \frac{1}{1 + \frac{[OCl^-]}{[HOCl]}} = \frac{1}{1 + K_i 10^{pH}} \quad (7.12)$$

7.3.3 Determinación de la concentración y tiempo de contacto del cloro

Para determinar los porcentajes de $HOCl$ y OCl^- del cloro total que se aplicará, se necesita saber el pH del agua a tratar. En el capítulo # 2, donde se describieron las características del agua de la zona que se va a tratar en tres diferentes puntos, se obtuvieron valores de pH de 7.26, 7.3 y 7.5 respectivamente. El promedio de estos tres valores es 7.35, el cual se utilizará para calcular los porcentajes de $HOCl$ y OCl^- .

Para determinar las fracciones de $HOCl$ y OCl^- que corresponden al pH del agua, se observa la Figura 7.2 y se leen los siguientes porcentajes para un pH de 7.35:

HOCl = 60% del cloro libre total

OCl⁻ = 40% del cloro libre total

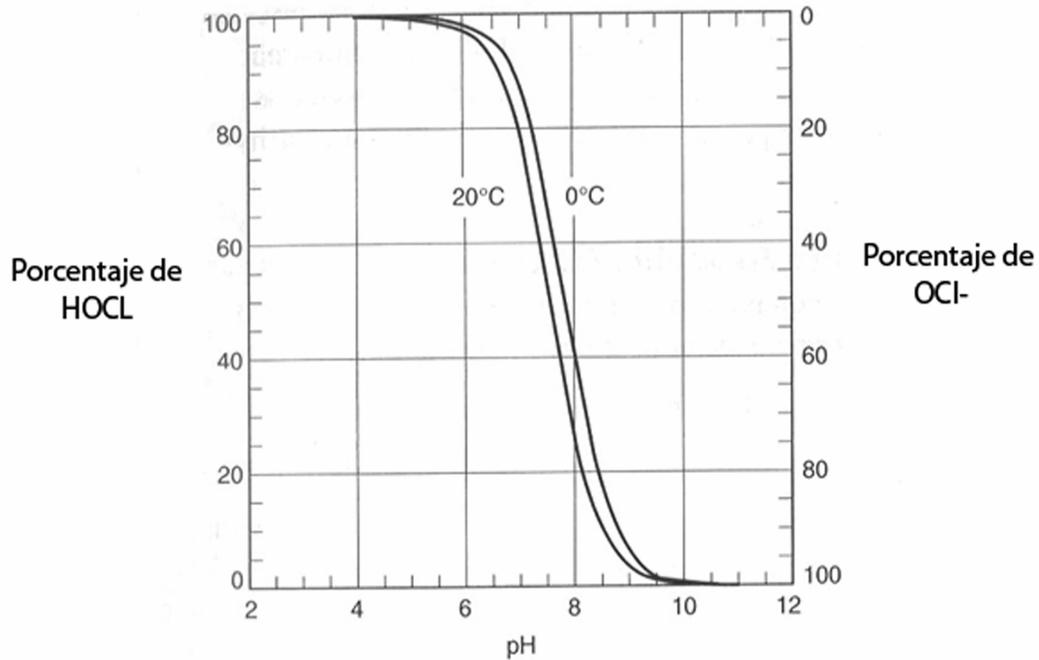


Figura 7.2 Porcentajes de HOCl y OCl⁻ con respecto a su pH (Metcalf & Eddy, 2003)

Para calcular el *CT* (concentración y tiempo de contacto) requerido para inactivar el 99% (2 ciclos logarítmicos) de coniformes fecales, se puede observar la Figura 7.3, la cual indica que:

A un pH de 8.5, el *CT* es de:

$$CT = 1 \text{ mg/l} \times 0.2 \text{ min} \quad (7.13)$$

$$CT = 0.2 \text{ mg-min/l}$$

Sin embargo, en la Figura 7.2 se observa que a un pH de 8.5, los porcentajes de HOCl y OCl⁻ son de 10 % y 90% respectivamente. Por lo que se necesita saber que cantidad de C_{HOCl} por tiempo se requiere con un porcentaje de 60% de HOCl. Por lo que:

$$C_{HOCl}t = 0.1(1\text{mg/l}) \times 0.2\text{min} \quad (7.14)$$

$$C_{HOCl}t = 0.02 \text{ mg-min/l}$$

Entonces se sabe que se debe tener un C_{HOCl}t = 0.02 mg-min/l, y suponiendo un tiempo de 30 minutos, se obtiene que:

$$0.02 \text{ mg-min/l} = 0.6(C_{\text{total}}) \times (t) \quad (7.15)$$

$$0.02 \text{ mg-min/l} = 0.6(C_{\text{total}}) \times (30 \text{ min})$$

despejando:

$$C_{\text{total}} = (0.023 \text{ mg-min/l}) / (0.6 \times 30 \text{ min}) \quad (7.16)$$

$$C_{\text{total}} = 0.001278 \text{ mg/l}$$

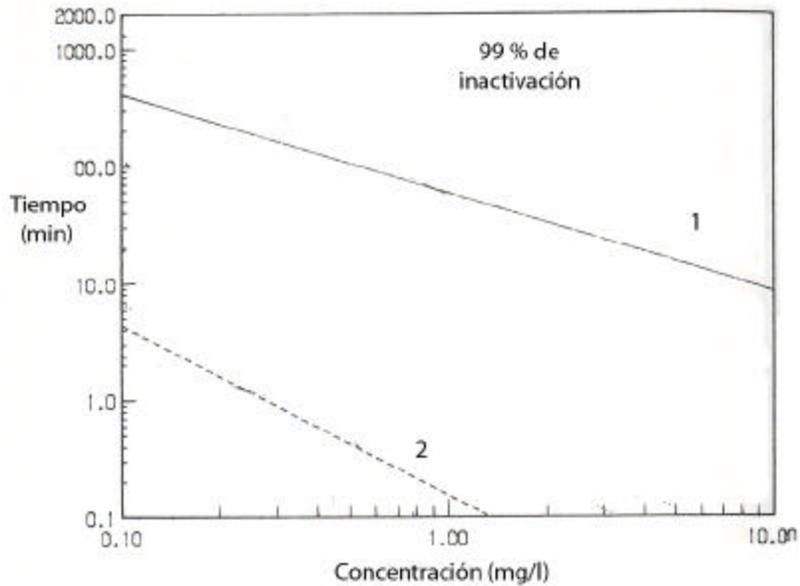


Figura 7.3 Concentración de cloro por tiempo.
 En donde la línea 2 representa la aplicación de cloro a los coliformes totales y la línea 1 representa la aplicación de cloro a *Giardia* (Metcalf % Eddy, 2003).

Este valor de $C_{total} = 0.001278$ mg/l, es la dosis que se requiere aplicar a un pH de 7.35 para inactivar el 99% de los coliformes presentes. Como se observa, este valor es muy pequeño, prácticamente mínimo. Lo cual indica que los coliformes son poco resistentes a la aplicación del cloro, y es muy fácil controlarlos utilizando este método.

A continuación se realizará el mismo procedimiento para inactivar el 99 % de *Giardia*. En la misma gráfica (7.2), se puede observar que a un pH de 6.0 se puede obtener un producto de:

$$CT = 1\text{mg/l} \times 70 \text{ min} \quad (7.17)$$

$$CT = 70 \text{ mg-min/l}$$

La Figura 7.1 muestra que a un pH de 6.0, el porcentaje de HOCl, es prácticamente el 100%.

Por lo que se tiene:

$$C_{HOCl}t = (1\text{mg/l} \times 1) \times 70 \text{ min} \quad (7.18)$$

$$C_{HOCl}t = 70 \text{ mg-min/l}$$

Con el pH de 7.35 de las aguas residuales que se deben tratar, y suponiendo un tiempo de contacto de 30 min, se tiene que:

$$70 \text{ mg-min/l} = 0.6(C_{\text{total}}) \times t \quad (7.19)$$

$$70 \text{ mg-min/l} = 0.6(C_{\text{total}}) \times 30 \text{ min}$$

despejando:

$$C_{\text{total}} = 3.89 \text{ mg/l}$$

Este valor de $C_{\text{total}} = 3.89 \text{ mg/l}$, es la concentración de cloro libre que se requiere aplicar a un pH de 7.35 para inactivar el 99% del Giardia presente. Este valor ya no es tan bajo como el que se obtuvo para inactivar a los coliformes, sin embargo, es un valor razonable, y se puede aplicar sin ningún problema.

Por último, se realizará el mismo procedimiento para inactivar el 99 % de Crypto. Se sabe que a un pH de 6.0, el CT requerido es aproximadamente de 3500 mg-min/l. Entonces:

$$C_{HOCl}t = 3500 \text{ mg-min/l} \quad (7.20)$$

$$3500 \text{ mg-min/l} = 0.6(C_{\text{total}}) \times 30 \text{ min}$$

despejando:

$$C_{\text{total}} = 194 \text{ mg/l}$$

Como se observa, el valor de $C_{\text{total}} = 194 \text{ mg/l}$ es exageradamente alto, y no se puede aplicar una cantidad tan grande de cloro al agua. Por lo que se va a requerir introducir desinfección por rayos UV, ya que el *C. paruum* no es muy resistente a esta radiación, y es fácil eliminarlos con este método.

En conclusión, dejaremos un tiempo de contacto de 30 minutos, y una concentración total de cloro de 10 mg/l, la cual inactiva perfectamente el 99% de los coliformes y del *Giardia*, pero no garantiza la eliminación de *C. paruum* como se muestra a continuación:

$$C_{\text{HOCl}t} = 0.6(10\text{mg/l}) \times 30\text{min} \quad (7.21)$$

$$C_{\text{HOCl}t} = 180 \text{ mg-min/l}$$

$$(180 \text{ mg-min/l}) / (3500 \text{ mg-min/l}) = 0.051$$

Esto quiere decir que solamente el 5% aproximadamente del *Crypto* podría ser eliminado aplicando 10 mg/l por 30 min, lo cual es muy pequeño, y confirma la necesidad de aplicar desinfección por medio de rayos UV para poder eliminar el *C. paruum*.

Con este tiempo de contacto de *30 minutos* y con esta concentración total de cloro de *10 mg/l*, es más que suficiente para inactivar a los virus, ya que estos no son muy resistentes a la desinfección con cloro.

7.4 Desinfección con radiación ultravioleta (UV)

En la última década se ha notado un creciente interés en la aplicación de radiación ultravioleta para desinfectar agua residual. Se ha podido comprobar que la radiación UV tiene propiedades germicidas importantes, que no contribuye a la formación de compuestos secundarios tóxicos.

7.4.1 Tipos de radiación ultravioleta

La porción del espectro electromagnético en la cual la radiación UV ocurre entre 100 y 400 nanómetros de longitud de onda (Figura 7.4). Precisamente, de acuerdo a su longitud de onda, la radiación UV se clasifica en: onda larga (UV-A), onda media (UV-B), y onda corta (UV-C). La porción germicida de la radiación UV es aquella con longitud de onda entre 220 y 260 nm, la cual se encuentra en su totalidad dentro del rango del UV-C. La razón por la cual en esta porción se encuentra el rango germicida es porque, aproximadamente a 260 nm, el ADN tiene una mayor absorción de UV, y por lo tanto es más susceptible de sufrir alteraciones.

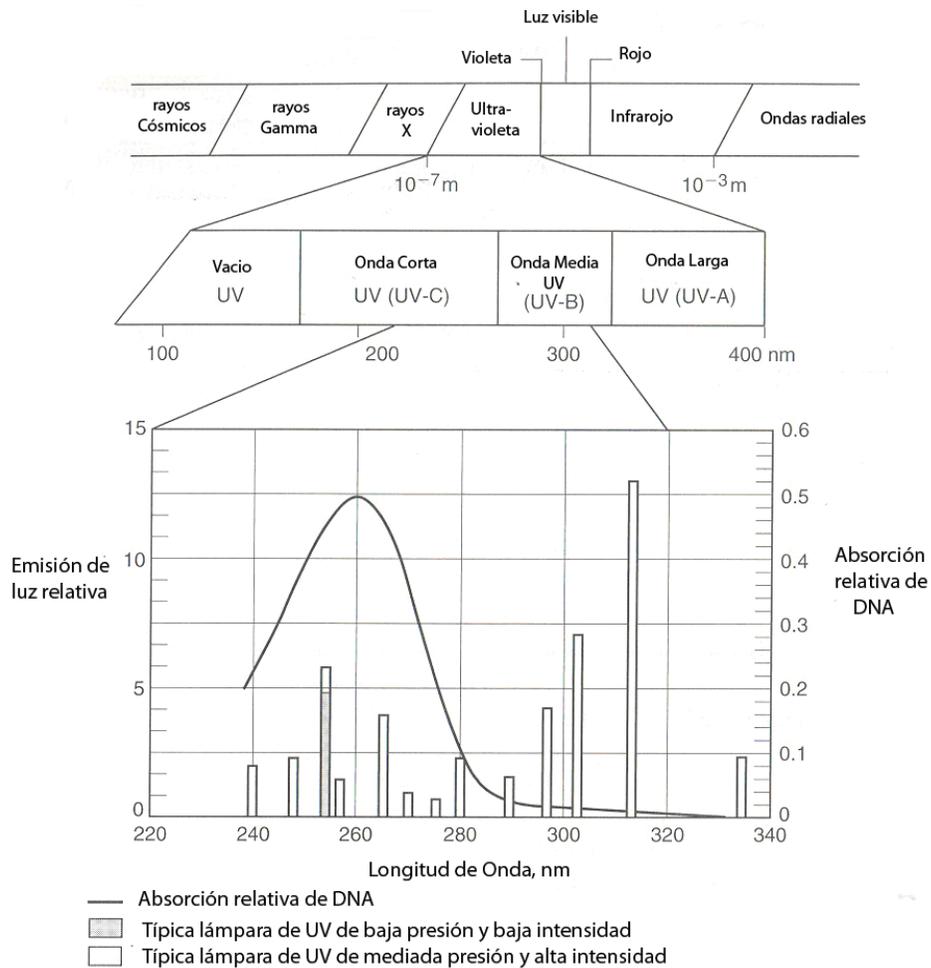


Figura 7.4 Espectro electromagnético. (Metcalf & Eddy, 2003)

7.4.2 Efectividad de la radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta es un agente desinfectante físico y no químico. La radiación UV penetra la pared celular de los microorganismos y es absorbida por los materiales celulares,

incluidos el ADN y ARN, lo cual puede impedir la reproducción o producir directamente la muerte a la célula. Debido a que sólo es efectiva la radiación UV que alcanza a las bacterias, es conveniente que el agua esté libre de turbiedad, ya que ésta podría servir de “escudo” a los microorganismos.

7.4.3 Lámparas de UV

Para producir radiación, se emplean lámparas de mercurio de baja o media presión. Las lámparas pueden estar suspendidas fuera del líquido o sumergidas en él. En el caso de tratarse de lámparas sumergidas, se encamisán en tubos de cuarzo para evitar el efecto refrigerante del líquido que se halla a su alrededor. En general, los sistemas de desinfección UV se pueden dividir en tres categorías basándose en los parámetros de operación interna de las lámparas de UV: baja presión-baja intensidad, baja presión-alta intensidad y mediana presión-alta intensidad.

7.4.3.1 Lámparas UV de baja presión-baja intensidad

Ésta lámpara de mercurio tiene la ventaja de que el 85% de la luz emitida es monocromática, haciéndola una opción eficiente para el proceso de desinfección. Cuenta con una longitud de onda de 253.7 nm, valor que se encuentra dentro del intervalo óptimo para la obtención de efectos germicidas, el cual es de 250 a 270 nm. En todos los casos, las lámparas de mercurio son utilizadas para generar las longitudes de onda de la región del UV-C. La longitud típica de las lámparas oscila entre 0.75 y 1.5 m, con un diámetro entre 15 y 20 mm. La potencia de salida de estas lámparas es de alrededor de 25 a 27 Watts a 254 nm.

7.4.3.2 Lámparas UV de mediana presión-alta intensidad

Estas lámparas de UV se han venido desarrollando en los últimos 15 años. Entre el 27 al 44% de la energía total de éstas lámparas se encuentra dentro del rango germicida de la longitud de onda del UV-C. Solamente entre el 7 y 15% de la potencia de salida se encuentra cerca de los 254 nm. Sin embargo, las lámparas de mediana presión-alta intensidad generan aproximadamente de 50 a 100 veces la potencia de UV-C de salida de las lámparas de baja presión-baja intensidad.

7.4.4 Definición de la Dosis UV

La efectividad de la desinfección por medio de rayos UV esta basada en la dosis de UV a la cual los microorganismos son expuestos. La dosis UV se calcula de la siguiente manera:

$$Dosis\ UV = I t \quad (7.22)$$

donde $Dosis\ UV =$ en mJ/cm^2 ($mW*s/cm^2$)

$I =$ intensidad de UV, en mW/cm^2 .

$t =$ tiempo de exposición de los microorganismos, s.

Como se puede ver en la ecuación anterior, la dosis de UV puede variar simplemente cambiando la intensidad o el tiempo de exposición.

7.4.5 Dosis requeridas para inactivar algunos microorganismos del agua residual

En la Tabla 7.2 se puede observar la porción de dosis de UV que se necesita para inactivar el 99 % de los siguientes microorganismos:

Tabla 7.2 Efectividad de la radiación UV para la desinfección de microorganismos. (Metcalf & Eddy,1996)

Organismo	Dosis relativa a la dosis para coliformes totales
<i>Bacteria:</i>	
Coliforme fecal	0.5-0.9
Coliforme total	1.0
<i>Virus:</i>	
Adenovirus	0.7-0.9
Polio tipo 1	0.9-1.1
MS-2 bacteriófago	0.9-1.0
<i>Protozoarios:</i>	
Cryptosporidium paruum	0.2-0.4
Giardia	0.4-0.6

En la Tabla 7.2 se puede observar que, para inactivar el 99 % del virus MS-2 bacteriófago, se requiere aproximadamente la misma dosis que para inactivar el 99 % de coliformes totales. Con esta información y con ayuda de la Figura 7.5, se puede observar que la dosis de UV necesaria para inactivar el 99 % del virus MS-2 bacteriófago es de 50 mJ/cm². Puesto que se sabe que el UV funciona similarmente para los coliformes totales, se deduce que la dosis de UV necesaria para coliformes es de 50 mJ/cm².

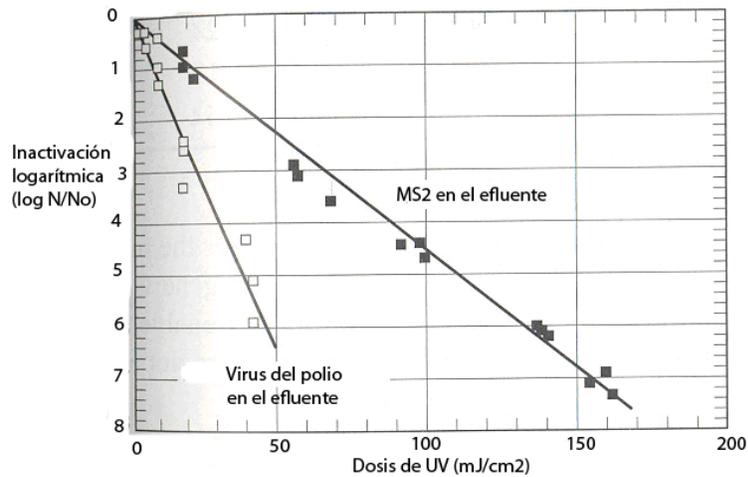


Figura 7.5 Dosis necesaria para inactivar el 99 % del virus MS-2 bacteriófago. (Metcalf & Eddy, 2003)

De la Tabla 7.2, se observa que la dosis de UV necesaria para *Giardia lamblia* es de 0.6×50 mJ/cm², o bien 30 mJ/cm². De igual manera, se observa que *C. parvum* en su caso extremo, requiere el 40 % de la dosis de UV que requieren los coliformes totales, por consiguiente se obtiene la dosis de UV necesaria para *C. parvum* es de 0.4×50 mJ/cm², o bien 20 mJ/cm².

Con estos resultados, se observa que los coliformes son mucho más resistentes a la radiación UV que los protozoarios. Existe la posibilidad de que puedan existir otros microorganismos totales como virus, bacterias o protozoarios, que resistan más a la radiación UV, pero éstos generalmente son fáciles de matar o inactivar con cloro.

De las lámparas de baja intensidad tenemos que su potencia de salida a 254 nm, es aproximadamente de 25 Watts. Por lo que de la ecuación de *dosis de UV = It*, se puede deducir que:

$$I = \frac{25W \cdot \frac{1000mW}{1W}}{A} \quad (7.23)$$

donde A = área de contacto de la lámpara de UV, siendo:

$$A = \pi DL \quad (7.24)$$

donde D = diámetro de la lámpara de UV.

L = longitud de la lámpara de UV.

De esta manera se podrá calcular la intensidad (I) requerida para inactivar a los microorganismos descritos anteriormente.

La Tabla 7.3 muestra diferentes tamaños de lámparas y su intensidad producida.

Las dosis de UV necesarias para el Crypto y el Giardia, fueron de 20 y 30 mJ/cm², por lo que con estos resultados de las intensidades, se puede deducir que el tiempo de exposición aplicando una lámpara de UV de 2 centímetros de diámetro (4 centímetros considerando el tubo de cuarzo) y 150 cm de largo es de:

$$t = \text{Dosis de UV} / I \quad (7.25)$$

$$t = (20 \text{ mJ/cm}^2) / (13.26 \text{ mW/cm}^2)$$

$$t = 1.5 \text{ segundos}$$

Tabla 7.3 Tamaños e intensidades producidas por lámparas de radiación UV. (Metcalf & Eddy, 2003)

D (cm)	L (cm)	A (cm ²)	Potencia de Salida (W)	I (mW/cm ²)
1.5	75	353.43	25	70.73
3.5*	75	824.69	25	30.32
2.0	100	628.32	25	39.79
4.0*	100	1256.64	25	19.89
2.0	150	942.48	25	26.53
4.0*	150	1884.96	25	13.26

*considerando el tubo de cuarzo que protege a la lámpara de UV.