

Ozono y Luz UV-C: Desinfección Avanzada de Agua en Emergencias

Autor: EA4IPV

Fecha: 23/03/2026

Categoría: Higiene y Prevención

Etiquetas: Sin etiquetas

Ozono y Luz UV-C: Desinfección Avanzada de Agua en Emergencias

La desinfección con ozono (O_3) y radiación ultravioleta-C (UV-C, 200-280 nm) representan las tecnologías más eficaces disponibles para la eliminación de patógenos en agua, superando incluso a la cloración en espectro y velocidad de acción. El ozono, un oxidante 50 veces más potente que el cloro y 3.000 veces más rápido, inactiva el 99,99% de bacterias, virus, protozoos (incluido *Cryptosporidium*, resistente al cloro) y destruye toxinas orgánicas. La radiación UV-C a 254 nm daña el ADN/ARN de los microorganismos impidiendo su replicación, con una dosis de 40 mJ/cm^2 suficiente para 4 log de reducción (99,99%) de la mayoría de patógenos según la EPA y la OMS. Ambas tecnologías no producen subproductos de desinfección peligrosos (a diferencia de los trihalometanos del cloro), pero requieren una fuente de energía eléctrica y agua de baja turbidez. En escenarios de emergencia, sistemas portátiles alimentados por energía solar hacen viable su uso en campo.

Radiación UV-C: principio y eficacia

La radiación UV-C con longitud de onda de 254 nm (la línea de emisión del mercurio) es absorbida directamente por los ácidos nucleicos (ADN y ARN) de los microorganismos, formando dímeros de timina (en ADN) y dímeros de uracilo (en ARN) que bloquean la replicación celular. A diferencia de los desinfectantes químicos, la UV-C no requiere tiempo de contacto prolongado: la inactivación es prácticamente instantánea al alcanzar la dosis requerida.

La eficacia de la UV-C depende de la dosis, medida en mJ/cm^2 (milijoules por centímetro cuadrado). La dosis es el producto de la intensidad de la lámpara (mW/cm^2) por el tiempo de exposición (segundos): $\text{Dosis} = \text{Intensidad} \times \text{Tiempo}$.

Patógeno

Dosis UV-C para 99,99% inactivación (mJ/cm^2)

Resistencia relativa

E. coli

6-10

Baja (muy sensible)

Vibrio cholerae

3-6

Muy baja

Salmonella

8-15

Baja

Virus Hepatitis A

20-30

Media

Rotavirus

25-40

Media

Giardia lamblia (quistes)

10-20

Baja-Media

Cryptosporidium parvum (ooquistes)

5-12

Baja (a diferencia de cloro)

Adenovirus

80-120

Alta (los más resistentes)

Bacillus subtilis (esporas)

30-60

Media-Alta

La OMS y la EPA de EE.UU. establecen una dosis mínima de 40 mJ/cm² como estándar para desinfección UV de agua potable. Esta dosis garantiza >4 log de reducción para la mayoría de patógenos, con la notable excepción de los adenovirus que requieren dosis mayores. En la práctica, los equipos comerciales suelen aplicar 40-100 mJ/cm² para proporcionar un margen de seguridad.

Turbidez y UV-C: La UV-C requiere agua clara (turbidez 0,3 mg/L) y el manganeso (>0,05 mg/L) también absorben UV-C y reducen la eficacia.

Equipos UV-C portátiles para emergencias

El mercado ofrece diversos dispositivos UV-C portátiles diseñados para el tratamiento de agua en campo. Estos van desde simples lámparas de inmersión hasta sistemas de flujo integrados con alimentación solar.

Lámparas UV-C de inmersión (tipo SteriPEN): Dispositivos manuales con lámpara UV-C de mercurio de baja presión o LED UV-C. Se sumergen directamente en el agua durante 60-90 segundos. Tratan 0,5-1 litro por ciclo. Funcionan con pilas AA o batería recargable por USB. Dosis típica: 40-80 mJ/cm². Eficaces para uso individual (1-4 personas). Limitación: solo para agua clara en recipientes pequeños.

Sistemas UV-C de flujo continuo: Unidades con cámara de acero inoxidable y lámpara UV-C interna por donde fluye el agua. Caudal típico: 2-10 L/min. Consumo: 10-40 W según capacidad. Pueden alimentarse con panel solar de 50-100 W + batería 12V. Ideales para comunidades de 20-200 personas. Incluyen sensor de intensidad UV que alerta cuando la lámpara pierde eficacia.

LEDs UV-C (265-280 nm): Tecnología emergente que reemplaza las lámparas de mercurio. Ventajas: no contienen mercurio tóxico, encendido instantáneo (sin precalentamiento), compactos, operan a bajo voltaje (3-5V DC). Desventaja actual: eficiencia eléctrica baja (~5%, frente al 30-40% de lámparas de mercurio) y potencia limitada. La eficiencia mejora cada año y se espera que dominen el mercado para 2028-2030.

Sistema DIY con panel solar: Es posible construir un sistema básico con: una lámpara UV-C germicida de 11-15 W, un tubo de acero inoxidable de 5 cm de diámetro, un panel solar de 50 W, un regulador de carga y una batería de 12V 7Ah. El agua fluye por el tubo a velocidad controlada (calculada para recibir >40 mJ/cm²). Coste total: 100-200 EUR.

Ozono: el desinfectante más potente

El ozono (O₃) es una molécula triatómica de oxígeno con un potencial de oxidación de 2,07 V, el más alto de los desinfectantes de agua prácticos (cloro: 1,36 V, dióxido de cloro: 1,57 V). Actúa destruyendo las paredes celulares, membranas y ácidos nucleicos de los patógenos por oxidación directa.

Parámetro

Ozono

Cloro libre

UV-C

Potencial de oxidación

2,07 V

1,36 V

No aplica (físico)

CT para E. coli (4 log)

0,02 mg·min/L

0,2 mg·min/L

6-10 mJ/cm²

CT para Giardia (3 log)

0,5 mg·min/L

45 mg·min/L

10-20 mJ/cm²

CT para Cryptosporidium (2 log)

5-10 mg·min/L

>7.200 mg·min/L

5-12 mJ/cm²

Eficacia contra virus

Excelente

Buena

Buena (excepto adenovirus)

Efecto residual

No (vida media 20 min)

Sí (horas-días)

No

Subproductos

Bromatos (si hay bromuro)

THM, HAA

Ninguno

El valor CT (concentración × tiempo) es el estándar para comparar desinfectantes. El ozono requiere un CT 10-100 veces menor que el cloro para la misma inactivación, lo que significa tiempos de contacto mucho más cortos. Para *Cryptosporidium*, el ozono es la única alternativa química viable (el cloro necesitaría días de contacto).

Seguridad con ozono: El ozono es tóxico por inhalación. La concentración máxima permitida en aire es 0,1 ppm (OMS/EPA) durante 8 horas. Concentraciones >0,3 ppm causan irritación respiratoria. Los generadores de ozono para tratamiento de agua deben operar en áreas ventiladas y disponer de un destructor de ozono residual (filtro de carbón activado o catalizador) en la salida de gases. Nunca usar generadores de ozono en espacios cerrados sin ventilación.

Generación de ozono en campo

El ozono no puede almacenarse (su vida media es de 20-30 minutos a temperatura ambiente) y debe generarse in situ. Existen tres tecnologías de generación aplicables a emergencias.

Descarga de corona (DBD): Método más común. Aire seco o oxígeno pasa entre dos electrodos separados por un dieléctrico sometidos a alto voltaje (5-20 kV). La descarga eléctrica convierte O₂ en O₃. Producción: 1-50 g O₃/hora según tamaño. Consumo: 10-20 Wh/g O₃. Requiere aire muy seco (Electrólisis (generadores de ozono en agua): Electrodo de diamante dopado con boro (BDD) o PbO₂ generan ozono directamente en el agua por electrólisis. No requieren aire seco. Producción menor pero suficiente para pequeños volúmenes. Consumo: 30-60 Wh/g O₃. Tecnología más simple para uso en campo con panel solar.

UV-generación (185 nm): Lámparas UV especiales que emiten a 185 nm (además de 254 nm) convierten O₂ del aire en O₃. Producción baja (~0,5 g/h) pero suficiente para tratamiento doméstico. Ventaja: misma lámpara desinfecta (254 nm) y genera ozono (185 nm). Estas lámparas deben usarse en cámaras cerradas ya que 185 nm también genera ozono en el aire ambiente.

Aplicación

Dosis de ozono

Tiempo de contacto

Volumen tratable/hora

Desinfección básica (4 log bacterias)

0,5-1 mg/L

5-10 min

10-50 L con generador portátil

Desinfección completa (incluye virus, quistes)

1-2 mg/L

10-15 min

5-25 L con generador portátil

Oxidación de hierro/manganeso

1-3 mg/L

5-10 min

Variable según concentración

Degradación de pesticidas

2-5 mg/L

15-30 min

Requiere generador industrial

Combinación UV-C + ozono y dimensionamiento solar

La combinación de UV-C y ozono (proceso de oxidación avanzada, AOP) es la opción más completa para agua de calidad incierta en emergencias. El ozono aplicado primero oxida hierro, manganeso y materia orgánica, reduciendo la turbidez. La UV-C aplicada después destruye los patógenos restantes y descompone el ozono residual, eliminando la necesidad de un destructor separado.

Secuencia recomendada: 1) Prefiltración gruesa (5-10 μm) para retirar partículas grandes. 2) Ozonización a 1-2 mg/L durante 10 minutos en tanque de contacto. 3) Filtración con carbón activado granular para retirar ozono residual y subproductos. 4) Desinfección UV-C a 40+ mJ/cm^2 como barrera final. Esta secuencia garantiza >6 log de reducción para todos los patógenos conocidos.

Dimensionamiento solar para sistema comunitario: Para un sistema UV-C de 20 W + generador de ozono de 30 W + bomba de 15 W = 65 W de consumo. Con 4 horas efectivas de operación al día y 5 horas sol pico: panel solar de 150 W + batería de 12V 50Ah + regulador MPPT. Capacidad: 200-400 litros/día, suficiente para 20-40 personas (10 L/persona/día para bebida y cocina).

Monitoreo de la eficacia: La UV-C se monitorea con sensor de intensidad UV-C (mW/cm^2) integrado en el equipo. Si la intensidad cae al 70% del valor inicial, reemplazar la lámpara. Para ozono: medir el residual con

test colorimétrico DPD (similar al cloro) o con kits específicos de ozono. El residual en el punto de consumo debe ser 0 mg/L (el ozono debe haberse descompuesto o sido filtrado).

Coste-beneficio en emergencias: Un sistema combinado UV-C + ozono solar cuesta 500-1.500 EUR iniciales pero tiene un coste operativo casi nulo (solo reemplazo de lámpara UV-C cada 9.000-12.000 horas, ~25-50 EUR). Comparado con la cloración (coste recurrente de productos químicos, problemas de sabor, trihalometanos) o la ebullición (coste de combustible, 1 kg de leña por cada 3-5 litros), el sistema solar se amortiza en 6-12 meses para comunidades de >20 personas.

 Advertencia: Esta información es orientativa y educativa. En situaciones de emergencia real, consulte a profesionales cualificados siempre que sea posible. No ponga en riesgo su vida ni la de otros sin la formación adecuada.