

UNA REFLEXIÓN SOBRE LA DESINFECCIÓN DEL AGUA EN LA RURALIDAD

Potencial del ozono con autonomía solar para puntos de interés sanitario

Resumen

El acceso a agua microbiológicamente segura sigue siendo un reto pendiente en las zonas rurales de Colombia y de muchos países del Sur Global. La cloración, método predominante, enfrenta limitaciones logísticas, de aceptabilidad y de generación de subproductos cuando se aplica en contextos dispersos y con infraestructura energética precaria. La ozonización, ampliamente reconocida por su alto poder oxidante y su capacidad de inactivar un espectro más amplio de patógenos sin dejar residuales organolépticos desagradables, se ha mantenido como una tecnología propia de sistemas urbanos de gran escala debido a su demanda de energía y a la necesidad de producir el gas *in situ*. Sin embargo, la convergencia de tres factores –la madurez de los sistemas fotovoltaicos, el desarrollo de generadores de ozono eficientes y compactos, y la urgencia de soluciones descentralizadas para puntos de interés sanitario como escuelas y centros de salud– abre una ventana de oportunidad para repensar la desinfección rural. Este artículo plantea una reflexión crítica sobre por qué la ozonización solar no ha despegado como alternativa autónoma para pequeñas comunidades, explora las barreras técnicas, económicas y culturales que frenan su adopción, y propone una agenda de investigación y desarrollo que conecte la innovación tecnológica con las realidades del terreno.

Palabras clave: ozonización solar, desinfección de agua, ruralidad, autonomía energética, puntos de interés sanitario, agua potable.

1. Introducción: la paradoja del agua rural

Colombia es un país de abundancia hídrica. El Estudio Nacional del Agua (ENA, 2022) reporta una disponibilidad superficial que supera los 2 000 km³/año; sin embargo, persisten hondas brechas en el acceso a agua segura. El Informe Nacional de Calidad del Agua (INCA) de 2023 revela que, mientras en la zona urbana el 59 % de los municipios suministró agua sin riesgo para consumo humano, en la zona rural solo el 14 % alcanzó esa condición. En el otro extremo, 74 municipios rurales presentaron niveles de riesgo “inviable sanitariamente” y en el 38 % de los municipios del país simplemente no se reportó dato alguno sobre la calidad del agua rural (INCA, 2023). La situación es aún más dramática en puntos de especial sensibilidad sanitaria: escuelas, puestos de salud, hogares comunitarios. Según el Ministerio de Educación Nacional, el 40 % de las sedes educativas rurales carecía de acueducto y el 13 % no disponía de energía eléctrica en 2016, y muchas de esas cifras apenas han variado (MEN, 2016).

Esta realidad configura un círculo vicioso: la desinfección convencional con cloro –que requiere una cadena de suministro estable, dosificación controlada y, a menudo, energía para su producción electroquímica– se vuelve inviable en entornos remotos, y las alternativas (hervido, filtración doméstica) resultan insuficientes o insostenibles. La consecuencia directa

se refleja en las tasas de enfermedad diarreica aguda (EDA), que en 2023 mantuvieron a los menores de un año con una incidencia de 130,9 casos por cada 1 000 habitantes (INS, 2023).

Frente a este panorama, ¿es posible imaginar un esquema de desinfección que no dependa de la red eléctrica, que no requiera transporte periódico de insumos químicos y que sea eficaz contra un amplio espectro de microorganismos? La respuesta puede estar en el acoplamiento de dos tecnologías maduras pero escasamente integradas: la generación de ozono *in situ* y la energía solar fotovoltaica. Este artículo reflexiona sobre las razones por las cuales esta combinación no ha trascendido del laboratorio a la comunidad y sobre las condiciones que podrían catalizar su adopción.

2. ¿Por qué el cloro no basta? Las limitaciones de la desinfección convencional en la ruralidad

El cloro ha sido el pilar de la desinfección del agua desde principios del siglo XX por su bajo costo, su efecto residual y la simplicidad relativa de su aplicación. No obstante, en el contexto rural colombiano –y en general en regiones de difícil acceso– estas ventajas se erosionan severamente. Las redes eléctricas intermitentes o inexistentes impiden la operación continua de hipocloradores automáticos; el transporte de cloro gas, hipoclorito de sodio o tabletas de tricloro se enfrenta a costos logísticos elevados y a riesgos de seguridad; y la aceptación sensorial por parte de los usuarios es frecuentemente baja debido al sabor y olor residuales. Adicionalmente, la formación de subproductos de la desinfección (trihalometanos, ácidos haloacéticos) es una preocupación creciente, sobre todo cuando el agua presenta carga orgánica elevada, como es común en fuentes superficiales rurales (Gomes et al., 2019).

Los datos del SIVICAP para 2023 muestran que el cloro residual libre fue uno de los parámetros con mayor incumplimiento en las muestras rurales: el 34,1 % de las determinaciones realizadas por la Superintendencia de Servicios Públicos en el marco del proyecto de inversión se situó fuera del rango aceptable de 0,3–2,0 mg/L (INCA, 2023). En muchos acueductos rurales, el cloro simplemente no llega a los puntos de consumo, ya sea por fallas en la dosificación, por la falta de infraestructura o por la naturaleza intermitente del servicio.

Así, la pregunta no es si el cloro es bueno o malo, sino si es la única opción técnicamente viable. La respuesta negativa abre la puerta a considerar desinfectantes alternativos que puedan generarse en el punto de uso y que no dependan de una cadena de suministro externa.

3. Ozonización: un viejo conocido, un eterno desconocido en pequeña escala

El ozono (O_3) se utiliza en la desinfección de agua potable desde la planta de Niza en 1906. Su poder oxidante ($E^0 = 2.07\text{ V}$) lo convierte en uno de los biocidas más efectivos: inactiva bacterias, virus, protozoos (incluidos *Cryptosporidium* y *Giardia*) y esporas en tiempos de

contacto del orden de minutos, y se descompone rápidamente en oxígeno sin dejar residuales organolépticos (von Gunten, 2003). Estudios recientes de revisión confirman que el ozono supera al cloro en la inactivación de quistes de *Giardia* y ooquistes de *Cryptosporidium*, patógenos particularmente resistentes que son responsables de buena parte de los brotes hídricos en países de ingreso medio y bajo (Gomes et al., 2019).

Sin embargo, el ozono tiene un talón de Aquiles: no puede almacenarse ni transportarse; debe producirse *in situ* mediante descarga corona o electrólisis, lo que demanda energía eléctrica. Esta característica ha confinado históricamente la ozonización a plantas de tratamiento medianas y grandes, con suministro eléctrico estable y personal técnico calificado. Además, la inversión inicial en generadores, contactores y sistemas de destrucción de ozono residual en el aire es superior a la de un simple hipoclorador.

En el ámbito rural, estas barreras han sido consideradas insalvables. Pero, ¿son realmente insalvables hoy? El desarrollo de generadores de ozono compactos (30–100 W), capaces de producir de 1 a 10 g O₃/h a partir de aire seco o de oxígeno concentrado, y la drástica reducción del costo de los paneles fotovoltaicos en la última década invitan a repensar el dogma. Un sistema de ozonización para tratar 1–2 m³/día –suficiente para una escuela o un puesto de salud– podría alimentarse con un arreglo fotovoltaico de 300–500 Wp y una batería de ciclo profundo de 200 Ah, garantizando la autonomía durante el día y eventualmente algunas horas de la noche. La producción diurna del oxidante, cuando los niños están en la escuela o los pacientes acuden al centro de salud, coincide con el patrón de demanda de estos puntos de interés sanitario, eliminando la necesidad de almacenamiento prolongado de agua tratada.

4. Autonomía energética solar: el eslabón perdido

La energía solar fotovoltaica ha dejado de ser una tecnología marginal. Colombia cuenta con un potencial solar promedio de 4,5 kWh/m²/día en buena parte del territorio, con regiones como la Costa Atlántica y los valles interandinos que superan los 5,0 kWh/m²/día (IDEAM, 2024). Los sistemas fotovoltaicos autónomos ya alimentan electrificación rural, bombeo de agua y refrigeración de vacunas en miles de localidades. Sin embargo, su utilización para alimentar procesos de desinfección química –más allá de la radiación ultravioleta directa– es todavía incipiente.

Pocos estudios han explorado explícitamente el acople ozono-solar en pequeña escala. Pawlat & Stryczewska (2011) evaluaron un sistema de ozonización para acondicionamiento de agua impulsado por energía solar en Polonia, demostrando la viabilidad técnica de la integración (Pawlat & Stryczewska, 2011). Osmero et al. (2021) diseñaron y probaron un prototipo de potabilización con energía solar fotovoltaica que incluía ozonización, enfocado en comunidades aisladas de Perú, con resultados prometedores en la remoción de indicadores bacteriológicos (Osmero et al., 2021). Estos trabajos, aunque escasos, prueban que la propuesta no es ciencia ficción.

Un aspecto crítico que emerge de estas experiencias es que el verdadero cuello de botella no está en la generación del ozono, sino en la transferencia eficiente del gas al agua y en el

control del proceso. El uso de dispositivos Venturi acoplados a bombas de baja potencia (12/24 V DC) permite alcanzar eficiencias de transferencia superiores al 80 % sin necesidad de torres de contacto complejas, siempre que se ajusten el caudal de agua y la succión del ozonizador. Aun así, la operación óptima de un sistema de este tipo requiere la caracterización local de la demanda de ozono del agua cruda –fuertemente dependiente de la materia orgánica, el pH y la temperatura– y el establecimiento de una curva de operación que relacione la irradiancia solar, la producción de ozono y el tiempo de contacto necesario para lograr la inactivación deseada.

Aquí radica una de las razones por las cuales la ozonización solar no ha despegado: no existe un “equipo universal” que funcione en cualquier fuente de agua; se necesita investigación aplicada, sitio-específica, que muchas veces no es priorizada por la academia ni por los fondos de cooperación.

5. ¿Por qué no se investiga en ozono solar? Barreras y distorsiones del mercado de la innovación

La pregunta es pertinente y admite múltiples respuestas complementarias:

a) Complejidad percibida y aversión al riesgo: Las agencias de cooperación y los gobiernos locales prefieren tecnologías “probadas” como el cloro o la filtración por membranas, aunque estas fallen repetidamente en el terreno. El ozono se asocia a plantas sofisticadas y a riesgos ocupacionales (toxicidad del gas), lo que genera resistencia entre los tomadores de decisiones.

b) Vacío de investigación interdisciplinaria: El estudio de la ozonización solar se sitúa en la intersección entre la ingeniería química, la energía renovable, la microbiología y la salud pública. Las convocatorias de investigación rara vez financian proyectos que crucen estas fronteras, y las publicaciones tienden a segmentarse en revistas monotemáticas.

c) Costos iniciales y economías de escala: Aunque un ozonizador de bajo caudal y un panel solar son accesibles en términos absolutos (un sistema completo ronda los US\$ 1 500–3 000), el costo por metro cúbico tratado sigue siendo superior al del cloro cuando este último se obtiene a precios subsidiados. No obstante, un análisis de ciclo de vida que internalice los costos logísticos, los riesgos de desabastecimiento y las externalidades en salud podría revertir esa conclusión.

d) Ausencia de estándares y regulación adaptada: En Colombia, la Resolución 2115 de 2007 y el RAS Título K reconocen la ozonización como método de desinfección, pero no definen lineamientos específicos para sistemas autónomos de pequeña escala. Esto genera inseguridad jurídica para operadores locales y desincentiva la inversión privada.

e) El espejismo de la “solución milagro” y la discontinuidad de los proyectos piloto: Son numerosos los prototipos desarrollados por universidades que, al finalizar la financiación, quedan abandonados sin un proceso de transferencia real a la comunidad. La falta de

modelos de negocio sostenibles (mantenimiento, reposición de repuestos) condena al olvido a muchas innovaciones prometedoras.

6. ¿La futura disponibilidad abre un mercado? Reflexión desde la realidad colombiana

Las tendencias globales sugieren que sí. La disminución del costo de los módulos fotovoltaicos (por debajo de US\$0.20/

Wpen2024), la disponibilidad de microcontroladores de bajo consumo para automatizar la operación y el crecimiento *off – grid solar market* *

crean las condiciones para un ecosistema de desinfección autónoma. En Colombia, el Plan Nacional de Desarrollo 2026 enfatiza la necesidad de soluciones diferenciales para zonas rurales y el cierre de brechas en agua potable. Un costo de 6–9 millones, una cifra comparable a la inversión en acueductos regionales de mucho mayor plazo de ejecución.

Pero abrir ese mercado exige, primero, demostrar la eficacia y la sostenibilidad en condiciones reales. La investigación doctoral y los semilleros universitarios pueden jugar un papel desencadenante si se enfocan en preguntas operativas concretas: ¿cuál es la dosis mínima de ozono requerida para inactivar *Enterococcus fecalis* o *E. coli* en aguas con turbiedad y carbono orgánico disuelto típicas del Pacífico colombiano? ¿Cómo varía la producción de ozono de un generador de descarga corona cuando la irradiancia solar fluctúa? ¿Qué esquema de operación (tandas, recirculación) optimiza el consumo energético? Los datos preliminares de proyectos en curso sugieren que con tiempos de contacto de 10–15 minutos y concentraciones de ozono disuelto de 0.2–0.3 mg/L se alcanzan reducciones de cuatro órdenes de magnitud en indicadores bacteriológicos, pero esta información necesita ser robustecida y publicada en revistas indexadas.

7. Más allá del ozono: alternativas autónomas y complementariedades

La reflexión no debe reducirse a una dicotomía cloro *versus* ozono. La irrigación con luz ultravioleta (UV-C) alimentada por paneles solares es otra tecnología madura y de bajo mantenimiento, aunque su eficacia cae drásticamente ante la presencia de sólidos en suspensión y no deja efecto residual. Los sistemas de electrocloración *in situ* a partir de sal común y energía solar ofrecen una alternativa atractiva, pero requieren reposición periódica de sal y generan subproductos clorados. La filtración por bioarena o por membranas de ultrafiltración con lavado a contracorriente manual representan opciones de barrera física con bajísimo requerimiento energético, pero no inactivan virus y pueden tener problemas de aceptación cultural.

La solución más robusta para puntos de interés sanitario quizá sea un tren híbrido: prefiltración gruesa, ozonización diurna para la desinfección primaria y almacenamiento seguro con un bajo residual de cloro o plata iónica para proteger el agua durante la noche. La energía solar actuaría como vector integrador, alimentando tanto la producción de ozono como una pequeña bomba de transferencia. Este enfoque modular permite adaptar cada etapa a las condiciones locales y distribuye el riesgo técnico.

8. Indicadores para la reflexión y la acción: más allá del IRCA

Cualquier discusión sobre calidad de agua en salud pública gravita alrededor del IRCA. Sin embargo, este índice, tal como se calcula en Colombia, captura principalmente parámetros de control operacional (turbiedad, cloro residual, coliformes totales) y puede enmascarar problemas graves en comunidades donde no se realizan muestreos o donde el análisis de patógenos específicos es inexistente. Para evaluar el impacto de tecnologías descentralizadas de desinfección, se necesitan indicadores complementarios:

- **Continuidad del suministro de agua segura en el punto de consumo**, medido con registradores de cloro/ozono residual en el vaso del usuario.
- **Incidencia local de EDA en menores de 5 años**, desagregada a nivel de vereda o centro educativo, usando los datos del SIVIGILA.
- **Costo total de propiedad por metro cúbico tratado**, incluyendo inversión inicial, reposición de componentes, mantenimiento y capacitación comunitaria.
- **Nivel de apropiación comunitaria**, evaluado mediante encuestas de percepción, disposición a pagar y capacidad de autogestión.

Solo cuando estos indicadores se integren en los pilotos de ozonización solar podremos saber si la tecnología es realmente apropiable y escalable.

9. Conclusión: un llamado a la investigación-acción transdisciplinaria

La ozonización con autonomía solar no es una panacea, pero sí una opción técnicamente viable que merece un lugar en el portafolio de soluciones para la desinfección del agua en la ruralidad. Su estancamiento obedece menos a limitaciones tecnológicas insalvables que a la inercia institucional, la fragmentación del conocimiento y la ausencia de una demanda articulada. Para romper este círculo, se necesita una alianza entre la academia, el Estado, las comunidades organizadas y el sector privado que aborde simultáneamente la investigación aplicada, la adecuación normativa y la construcción de modelos de negocio incluyentes.

Los programas de maestría y doctorado en ingeniería, salud pública y ciencias ambientales tienen la responsabilidad de formar profesionales capaces de diseñar, validar y transferir estas tecnologías, evitando el síndrome del prototipo de laboratorio que nunca llega al usuario. La reflexión final es, entonces, una invitación: ¿cuánto tiempo más seguiremos tratando el agua de un hospital rural con el mismo paradigma de la planta de tratamiento de la gran ciudad, mientras el sol nos ofrece cada día la energía para producir, en el mismo punto de uso, uno de los oxidantes más poderosos de la naturaleza?

Referencias

1. Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Instituto Nacional de Salud & Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2024). *Informe Nacional de Calidad del Agua para Consumo Humano – INCA 2023*. Bogotá.
2. Ministerio de Educación Nacional. (2016). *Diagnóstico de la infraestructura educativa rural en Colombia*. Bogotá.
3. Instituto Nacional de Salud. (2024). *Informe de evento: Enfermedad Diarreica Aguda, año 2023*. Bogotá.
4. Gomes, J., Matos, A., Gmurek, M., Quinta-Ferreira, R. M., & Martins, R. C. (2019). Ozone and photocatalytic processes for pathogens removal from water: A review. *Catalysts*, 9(1), 46. <https://doi.org/10.3390/catal9010046>
5. von Gunten, U. (2003). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, 37(7), 1443–1467. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00457-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00457-8)
6. IDEAM. (2024). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Bogotá.
7. Pawlat, J., & Stryczewska, H. D. (2011). Solar energy for water conditioning. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, 5(9), 443–446.
8. Osmero, I., Girón, F., Peña, C., & Iglesias, M. (2021). Sistema para potabilizar agua, alimentado por energía solar fotovoltaica y del sistema electroenergético nacional. *Revista de Ingeniería y Desarrollo*, 8(3).