REVISIÓN TÉCNICA • PROCESO DE OXIDACIÓN AVANZADA

Oxicloruro mineral Reactivo de oxidación avanzada

Una fórmula de oxidación avanzada de segunda generación basada en la química modificada de Fenton–Haber–Weiss, comercializada lista para usar como un oxidante y desinfectante potente y ecológico que no requiere fuente de energía externa y no presenta riesgo de inflamabilidad ni de explosión.

Elaborado por el equipo técnico de Oxysolution

2.8–2.9 V
POTENCIAL DE OXIDACIÓN: 2.º LUGAR, SOLO DESPUÉS DEL FLÚOR (3.1 V)

EPA
REGISTRADO BAJO FIFRA

12 / 12
PRINCIPIOS DE QUÍMICA VERDE DE LA EPA CUMPLIDOS

Fundamentos químicos

Los oxicloruros minerales, representados por la fórmula $M_xO_yCl_z$, son una familia de compuestos que unen oxígeno y cloro a elementos minerales de transición. Un enlace mineral–oxígeno (M–O) firme en el plano coexiste con interacciones débiles de van der Waals, fuera del plano, entre capas adyacentes de cloruro (Cl–Cl).

En medio acuoso, $[(M_xO_yCl_z)_{(aq)}]$, estas estructuras impulsan la separación fotocatalítica del agua con alta eficiencia y la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) muy reactivas. Las moléculas están unidas débilmente a propósito: al entrar en contacto con compuestos inorgánicos, microorganismos y materia orgánica, liberan con facilidad átomos de oxígeno que oxidan los contaminantes de forma agresiva.

La solución es un reactivo de Fenton modificado que produce principalmente radicales hidroxilo. La reacción de Haber–Weiss simplifica la vía principal de conversión.

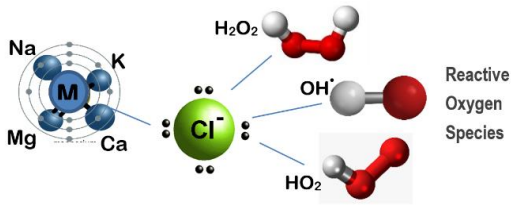


Figura 1. Estructuras propuestas para los oxicloruros minerales y las especies reactivas de oxígeno que liberan en el agua.

VÍA PRINCIPAL DE HABER–WEISS

$O_2\bullet^- + H_2O_2 \rightarrow$ *(catalizador metálico)* $\rightarrow O_2 + OH\bullet + OH^-$

LIDERAZGO EN OXIDACIÓN

Los radicales hidroxilo le dan al reactivo de oxicloruro mineral el mayor potencial electroquímico de la industria del tratamiento de agua, estimado en 2.80–2.90 V, solo superado por el flúor (3.1 V), que no se usa en el tratamiento de agua. Los minerales actúan como catalizadores, por lo que toda la potencia generada se crea y se aprovecha a nivel atómico.

Mecanismo de acción

Los procesos de oxidación avanzada generan radicales hidroxilo en cantidad suficiente para provocar cambios importantes a nivel molecular en los contaminantes del agua, degradando la mayoría de los compuestos hasta su forma elemental e inocua. El reactivo de oxicloruro mineral es una tecnología homogénea de base química: potente, de acción rápida y eficaz de forma confiable contra todos los microorganismos conocidos, que no sobreviven al nivel de estrés oxidativo que generan sus ROS. Cuenta con certificación NSF y registro EPA bajo FIFRA para aplicaciones de tratamiento de agua, agrícolas y de poscosecha.

Además del radical hidroxilo, el reactivo aporta grandes cantidades de iones hidroxilo y de oxígeno singlete, superóxido, aniones hidroperóxido y radicales perhidroxilo. El conjunto de ROS logra un potencial de oxidación mayor que cualquier especie por separado gracias a un efecto sinérgico, catalizado por la energía vibracional interna de los minerales de transición, con toda la potencia creada y aprovechada a nivel atómico. Los radicales hidroxilo se forman en mayor cantidad y siguen más de una vía: la disociación, la excitación y la ionización de las moléculas de agua.

Las ecuaciones (1)–(5) describen la generación de radicales hidroxilo cuando las moléculas de agua se disocian, se excitan y se ionizan bajo el efecto catalítico de los minerales de transición.

DISOCIACIÓN

$H_2O + e^- \rightarrow OH\bullet + H\bullet + e^-$ (1)

EXCITACIÓN

$H_2O + e^- \rightarrow H_2O* + e^-$ (2)

$H_2O* + H_2O \rightarrow H_2O + OH\bullet + H\bullet$ (3)

IONIZACIÓN

$H_2O + e^- \rightarrow H_2O^+ + 2e^-$ (4)

$H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + OH\bullet$ (5)

POTENCIAL DE OXIDACIÓN DE OXIDANTES COMUNES

REACTIVO	FÓRMULA	VOLTS
Flúor	F_2	3.06
Oxicloruro mineral	$M_xO_yCl_z$	**2.8–2.9**
Radical hidroxilo	OH•	2.80
Ion de oxígeno	O^-	2.42
Ozono	O_3	2.07
Peróxido de hidrógeno	H_2O_2	1.78
Radical perhidroxilo	HO_2	1.70
Dióxido de cloro	ClO_2	1.57
Ácido hipocloroso	HOCl	1.49
Cloro gas	Cl_2	1.36
Oxígeno (molécula)	O_2	1.23
Ion hipoclorito	OCl^-	0.94
Hipoclorito de sodio	NaOCl	0.94
Anión hidroperóxido	HO_2^-	−0.88
Radical superóxido	O_2^-	−2.40

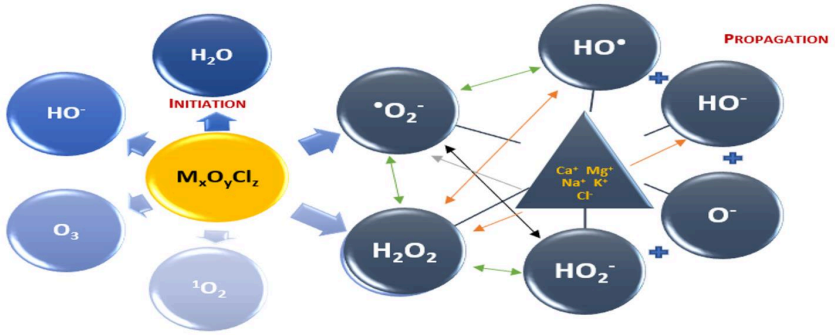


Figura 2. Fases de la reacción en cadena del reactivo de oxicloruro mineral: iniciación, propagación y terminación. La reacción es autocatalizada por los catalizadores minerales propios (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Cl^-).

Degradación de contaminantes

La degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos por los radicales hidroxilo es robusta y extremadamente rápida. Las reacciones de oxidación con contaminantes orgánicos avanzan por adición o eliminación de átomos de hidrógeno, sustitución electrofílica de enlaces insaturados y transferencia de electrones, y producen radicales centrados en carbono (R•) que reaccionan con oxígeno molecular para formar radicales peroxilo orgánicos (ROO•) y, al final, cetonas, aldehídos y alcoholes.

El peróxido de hidrógeno se genera como intermediario y, en presencia de los catalizadores minerales, reacciona en reacciones secundarias para producir nuevos radicales hidroxilo. Los contaminantes se desintegran en intermediarios no reactivos y biodegradables que siguen mineralizándose hasta producir CO_2 y H_2O.

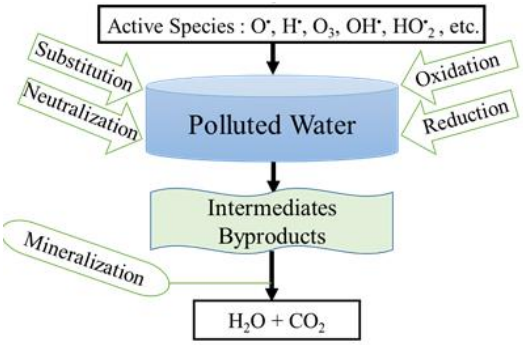


Figura 3. Degradación de contaminantes en el agua por oxidación avanzada, con H_2O + CO_2 como resultado final.

Relación pH ↔ ORP

Cuando el pH baja, el ORP sube. En la cloración tradicional, la eficacia de la desinfección depende del pH: el ácido hipocloroso (HOCl) alcanza su máximo a pH 4–5.5, y la desinfección ideal ocurre a pH 5–7. En la oxidación avanzada con oxicloruros minerales, un pH más bajo mejora el proceso, pero las especies reactivas de oxígeno, encabezadas por el radical hidroxilo, siempre dominan sobre las especies de cloro.

Las ROS actúan tan rápido que cubren la demanda oxidante y biocida antes que las especies reactivas de cloro, lo que eleva el cloro libre residual por el HOCl y el OCl^- que no se consumen. Entonces el HOCl puede abrir otra vía que aumenta los radicales hidroxilo a partir de reacciones secundarias.

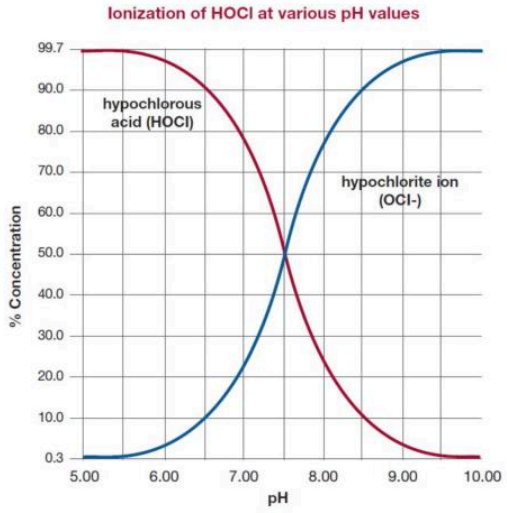


Figura 4. Ionización de las especies reactivas de cloro (HOCl / OCl^-) según el pH.

Mecanismo biocida

La función biocida del radical hidroxilo se debe al estrés oxidativo que daña el ADN, las proteínas y los lípidos, y causa la muerte celular por lisis; es eficaz contra el biofilm y la vida planctónica con un tiempo de contacto mínimo. Las membranas biológicas están formadas por cadenas de ácidos grasos insaturados; el OH• ataca sus dobles enlaces y deja un electrón desapareado que se une al oxígeno para formar un radical peroxilo. Esta peroxidación lipídica degrada de forma irreversible la función de la membrana al alterar su distribución espacial. Las ROS también entrecruzan proteínas mediante enlaces disulfuro y mutan el material genético, y destruyen el biofilm al oxidar su matriz de polisacárido extracelular (EPS) y alterar la señalización celular.

Implementación y eficacia

El reactivo de oxicloruro mineral ofrece el mayor nivel de desinfección y purificación de agua a un costo casi igual al de la cloración tradicional: listo para usar, fácil de escalar hacia arriba o hacia abajo, y capaz de adaptarse a sistemas de ozonación y UV para mejorar su desempeño y reducir la demanda de energía.

FACTOR DE IMPLEMENTACIÓN	DETALLE
Inversión de capital	A menudo insignificante: solo se requiere un sistema de dosificación líquido con un controlador automático de ORP.
Complejidad de operación	Muy sencilla con monitoreo de ORP; no requiere personal con capacitación especial.
Mantenimiento	Mantenimiento muy bajo del equipo y del sistema.
Riesgos	Muy corrosivo en forma concentrada, pero no inflamable y sin riesgo de explosión.
Estabilidad	Vida de anaquel mínima de 6 meses para obtener el máximo desempeño.
Espacio requerido	Muy reducido: los sistemas de dosificación y monitoreo se pueden montar en la pared.
Almacenamiento	Condiciones normales de almacenamiento, protegido de la luz solar directa.

PARÁMETRO DE EFICACIA	DESEMPEÑO
Oxidación de contaminantes	Excelente AOP a 2.8–2.9 V; <1 mg/L por mg/L de inorgánicos, 1–8 mg/L por mg/L de orgánicos.
Sabor, color y olor	Excelente. Oxida los compuestos de sabor y olor a partir de un ORP de +350 mV; un ORP mayor elimina el color.
DBO y DQO	Excelente. En efluentes industriales, aproximadamente 1 mg/L por cada 5–15 mg/L de DQO.
H_2S, hierro y manganeso	Excelente. Elimina el sulfuro de hidrógeno a razón de 1 mg/L por cada 2 mg/L de H_2S.
Desinfección de patógenos	Excelente y muy rápida mediante estrés oxidativo y lisis: 1 mg/L por cada 1,000–10,000 mg/L de bacterias, virus, parásitos, amibas y protozoarios.
Control de biofilm	Excelente. Oxida la matriz de EPS y altera su integridad y la señalización celular.
Solubilidad en agua	Solubilidad instantánea del 100%.
Subproductos de desinfección	Reduce los precursores y no genera subproductos de desinfección; descompone los subproductos orgánicos de desinfección existentes. Sin bromato; clorito y clorato despreciables incluso con cloro residual.
Sensibilidad al pH	Eficaz en un amplio rango de pH 4–9.
Temperatura alta	Una temperatura más alta aumenta la reactividad; no se degrada ni se desprende del agua en forma de gas.
Protección residual	Excelente. Con un ORP de +700 mV o más, el sistema se mantiene limpio; el residual se sostiene con la energía oxidativa y se puede medir como cloro libre.

Certificado NSF | Registrado EPA bajo FIFRA | 12/12 principios de química verde | No produce bromato | Eficaz a pH 4–9

CONTACTA A OXYSOLUTION

Para más información, visita www.oxysolution.com.mx o escribe a ventas@oxysolution.com.mx.