

Tratamiento avanzado de aguas residuales para riego mediante oxidación con ozono: una alternativa ecológica

Autor principal: M^a del Mar Pérez Calvo

Institución: Cosemar Ozono, S.L.

Teléfono: 91 571 50 64

E-mail: laboratorio@cosemar-ozono.com

Otros autores:

INTRODUCCIÓN

Más de mil millones de personas en el mundo no tienen acceso a agua potable. Para el fin del siglo se estima que un 80% de los habitantes urbanos de la Tierra no dispongan de suministros adecuados de agua potable. Sólo una pequeña cantidad del agua dulce del planeta (aproximadamente el 0,008%) está actualmente disponible para el consumo humano. Un 70% de la misma se destina a la agricultura, un 23% a la industria y sólo un 8% al consumo doméstico.

Al mismo tiempo que la demanda de agua potable aumenta, su suministro disminuye debido a las fuertes sequías que la mitad de las naciones del mundo experimentan regularmente. Como consecuencia, la población, en constante crecimiento, extrae agua de los acuíferos a un ritmo mayor del tiempo que tarda en reponerse por medios naturales, incluso en países templados, mientras la contaminación de las aguas marinas y continentales no cesa de aumentar.

Resulta, pues, evidente, y más en países como el nuestro que se enfrentan a una creciente escasez de agua, la necesidad de enfoques globales respecto a su uso. Una buena medida para la disminución de su consumo indiscriminado consiste en recurrir a la **reutilización de aguas residuales** para llenado de acuíferos, riego de cultivos o jardines, procesos industriales, aguas de baño, recreo y otros usos. Tanto es así que, por ejemplo la Comunidad de Madrid, que en el mes de junio ha llegado a tener sus pantanos con niveles cercanos al 30% de su capacidad, ha puesto en marcha un plan para aprovechar los recursos hídricos de la región, y que contempla el reciclaje del agua de las depuradoras. Este plan permitirá reutilizar el agua para riego de zonas verdes y supondrá un ahorro de seis millones de metros cúbicos de agua al año.¹



2.- QUÉ SON LAS AGUAS RESIDUALES

El agua que encontramos en la Naturaleza lleva disueltas, o en suspensión, determinadas sustancias adquiridas a lo largo del recorrido de parte de su ciclo, en la superficie o en el interior de la Tierra. Pero, además de los compuestos de origen natural, existen otros que tienen su origen en sustancias de desecho producidas como consecuencia de la actividad humana, bien arrojadas directamente al agua, usándola como vehículo para eliminar productos molestos, bien llegadas a ella como consecuencia del lavado por el agua de zonas que las contenían.

Pueden definirse las aguas residuales como el conjunto de aguas que lleva elementos extraños, bien por causas naturales, bien provocadas de forma directa o indirecta por la actividad humana, estando compuestas por una combinación de:

-  Líquidos de desagüe de viviendas, comercios, edificios de oficinas e instituciones.

¹ El Mundo, miércoles 21 de junio de 2006.

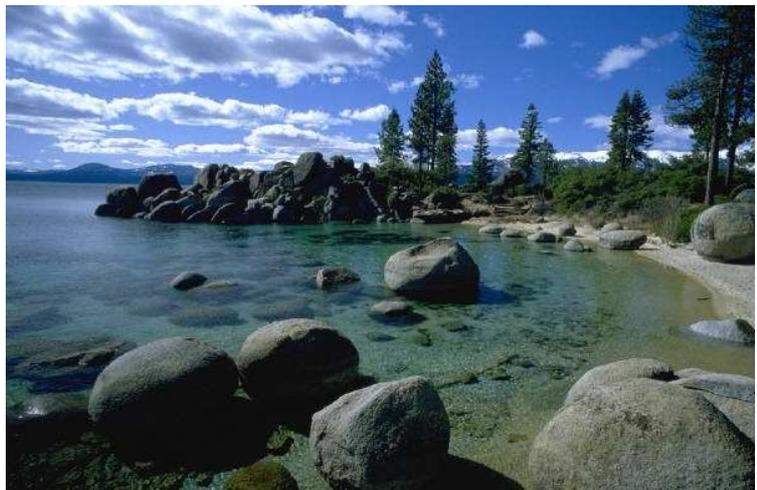
- ✚ Líquidos efluentes de establecimientos industriales.
- ✚ Líquidos efluentes de instalaciones agrícolas y ganaderas.
- ✚ Aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que discurren por calles, espacios libres y tejados y azoteas de edificios que pueden ser admitidas y conducidas por las alcantarillas.

Los efectos negativos que estas aguas residuales pueden producir en los cauces receptores son de varios tipos, siendo los más importantes:

- ✚ Olores y sabores desagradables motivados por las sustancias presentes en su seno y como consecuencia de su descomposición en ausencia de oxígeno, con desprendimiento de gases.
- ✚ Toxicidad de algunos compuestos minerales y orgánicos, con acción sobre la fauna y la flora del cauce receptor y los consumidores posteriores de este agua.
- ✚ Infecciones provocadas por la presencia de bacterias, virus u otros microorganismos, los cuales encuentran en las aguas residuales un modo de propagación. Se han aislado en aguas residuales microorganismos de las especies *Salmonella*, *Shigella*, *Escherichia coli*, *Campylobacter*, *Yersinia enterocolítica*, *Clostridium perfringens*, *Vibrio cholerae*, virus de la hepatitis A, la poliomielitis, rotavirus y enterovirus.
- ✚ Alteración estética de los medios receptores, como consecuencia de las variaciones de color o de la acumulación de variados productos de desecho.
- ✚ Polución térmica, que algunos efluentes de tipo industrial pueden provocar.
- ✚ Eutrofización de las masas de agua receptoras por altas concentraciones de compuestos como nitratos y ácidos ortofosfóricos, que estimulan el crecimiento de la microflora, disminuyendo el uso del agua para abastecimiento.

3.- LA DEPURACIÓN DE AGUAS EN LA HISTORIA

Los métodos de depuración de residuos se remontan a la antigüedad, habiéndose encontrado instalaciones de alcantarillado en lugares prehistóricos de Creta y en las antiguas ciudades asirias. Las canalizaciones de desagüe construidas por los romanos todavía funcionan en nuestros días. Aunque su principal función era el drenaje, la costumbre romana de arrojar los desperdicios a las calles significaba que, junto con el agua de las escorrentías, viajaban grandes cantidades de materia orgánica. De esta manera se procedía a la evacuación de aguas residuales fuera de los núcleos urbanos; ya en la antigua Atenas era utilizado este sistema, usándose el agua evacuada como posterior agua de riego.



Sin embargo, el precedente de la recogida de aguas residuales se sienta en el siglo XIX, surgiendo su tratamiento sistemático a finales del siglo pasado. Antes de esa época, la relación entre contaminación y enfermedad era desconocida, hasta que, en la segunda

mitad del siglo XIX, Koch y Pasteur desarrollan la teoría de los gérmenes. Más adelante, con el crecimiento de las ciudades, se puso de manifiesto la insuficiencia de los medios de autodepuración de los cauces receptores, por lo que el propósito del tratamiento fue acelerar los procesos naturales, bajo condiciones controladas.

Depuración de aguas es el nombre que reciben hoy día los distintos procesos implicados en la extracción, tratamiento y control sanitario de los productos de desecho arrastrados por el agua y procedentes de viviendas e industrias. La depuración cobró importancia progresivamente desde principios de la década de los 70, como resultado de la preocupación general sobre el problema, cada vez mayor, de la contaminación humana del medio, desde el aire a los ríos, lagos, océanos y aguas subterráneas, por los desperdicios domésticos, industriales y agrícolas.



Durante muchos años, el principal objetivo de la eliminación de residuos urbanos fue tan sólo reducir su contenido en materias que demandan oxígeno, sólidos en suspensión, compuestos inorgánicos disueltos (en especial compuestos de fósforo y nitrógeno) y bacterias patógenas. En los últimos años, por el contrario, se ha hecho más hincapié en mejorar los medios de eliminación de los residuos sólidos generados en los procesos de depuración, así como en la reutilización del agua depurada.

Esta reutilización es posible gracias a los tratamientos avanzados de las aguas residuales, que incluyen pasos adicionales a la depuración para mejorar la calidad del efluente, destruyendo los contaminantes

recalcitrantes. Hay procesos que permiten eliminar más de un 99% de los sólidos en suspensión y reducir la DBO₅ en similar medida. Si se pretende la reutilización del agua residual, es imprescindible una buena desinfección. Dentro de los sistemas existentes, la desinfección por tratamiento con ozono es considerado el método más fiable.

4.- EL SANEAMIENTO URBANO

El origen, composición y cantidad de los desechos generados en un medio urbano está relacionado con los hábitos de vida vigentes en él. Cuando un producto de desecho se incorpora al agua, el líquido resultante recibe el nombre de agua residual.

El Saneamiento tiene por objeto la evacuación y depuración, hasta niveles aceptables para el medio ambiente, de las aguas residuales urbanas (domésticas e industriales) y de las aguas de escorrentía pluvial.

El saneamiento urbano se inicia en la acometida domiciliaria o albañal. Los vertidos industriales también pueden ser incorporados al alcantarillado urbano en la medida en que cumplan determinadas condiciones destinadas a salvaguardar la integridad de la infraestructura, la seguridad de los operarios, la tratabilidad de las aguas residuales urbanas y la calidad necesaria de los lodos.

Las aguas de escorrentía pluvial pueden evacuarse, o no, conjuntamente con las aguas residuales domésticas e industriales, dando lugar a los sistemas denominados unitarios, o separativos.

La fase final del saneamiento es la depuración de aguas residuales y su posterior vertido en condiciones ambientales aceptables, lo que se comprueba mediante diversas mediciones físicas, químicas y biológicas. Las más comunes incluyen la determinación del contenido en sólidos, la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y el pH.

La depuración conlleva la realización de dos actividades adicionales muy importantes, que pueden ser objeto de sendos servicios diferenciados. Una es el tratamiento y disposición o utilización última de los fangos, y otra es la reutilización de las aguas residuales, previo su acondicionamiento al uso destinado.

La depuración es una obligación, impuesta tanto para salvaguardar la salubridad de los ciudadanos como para preservar el medio, evitando perjuicios a los usuarios del mismo.

El grado de depuración, e incluso la elección del punto de vertido, vendrán determinados por la planificación que se realice a nivel regional o de cuenca.

5.- CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

La composición del agua residual a tratar debe conocerse antes del tratamiento para que éste resulte eficaz. La *caracterización* del agua permite conocer los elementos químicos y biológicos que contiene, proporcionando la información necesaria para el diseño de una planta de tratamiento eficaz.

Como hemos indicado, la composición de las aguas residuales se establece con diversas mediciones físicas, químicas y biológicas, sobre todo mediante la determinación de su contenido en sólidos, la concentración de materia orgánica (DBO₅ y DQO) y el pH.



- a) **Residuos sólidos:** comprenden los sólidos disueltos y en suspensión. Los sólidos disueltos son productos capaces de atravesar un papel de filtro, y los suspendidos los que no pueden hacerlo. Los sólidos en suspensión se dividen a su vez en depositables y no depositables, dependiendo del número de miligramos de sólido que se depositan a partir de 1 litro de agua residual en una hora. Todos estos sólidos pueden dividirse en volátiles y fijos, siendo los volátiles, por lo general, productos orgánicos y los fijos materia inorgánica o mineral.
- b) **Concentración de materia orgánica:** se mide con los análisis DBO₅ y DQO.
 - b.1.) **DBO₅** (demanda biológica o bioquímica de oxígeno): es la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos a lo largo de un periodo de cinco días para descomponer la materia orgánica de las aguas residuales a una temperatura de 20°C.

b.2) DQO (demanda química de oxígeno): es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medio de dicromato en una solución ácida y convertirla en dióxido de carbono y agua. El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO₅ porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse química, pero no biológicamente.

La DBO₅ suele emplearse para comprobar la carga orgánica de las aguas residuales municipales e industriales biodegradables, sin tratar y tratadas. La DQO se usa para comprobar la carga orgánica de aguas residuales que, o no son biodegradables o contienen compuestos que inhiben la actividad de los microorganismos.

c) pH: mide la acidez o basicidad de una muestra de aguas residuales.

Los valores típicos para los residuos sólidos y la DBO₅ del agua residual doméstica aparecen en la tabla adjunta. El contenido típico en materia orgánica de estas aguas es un 50% de carbohidratos, un 40% de proteínas y un 10% de grasas; y su pH puede encontrarse entre valores de 6,5 a 8,0.

TIPOS DE SÓLIDOS	Sólidos (mg/L)			DBO ₅ mg/L	DQO mg/L
	a. Fijos	b. Volátiles	TOTAL		
1.- Disueltos	210	210	420	30	42
2.- Suspendidos	70	175	245	110	108
2.1.- Precipitables	45	100	145	50	42
2.2.- No precipitables	25	75	100	60	66
TOTAL	280	385	665	140	150

No es fácil caracterizar la composición de los residuos industriales con arreglo a un rango típico de valores dado según el proceso de fabricación. La concentración de un residuo industrial se pone de manifiesto enunciando el número de personas, o equivalente de población (PE), necesario para producir la misma cantidad de residuos. Este valor acostumbra a expresarse en términos de DBO₅. Para la determinación del PE se emplea un valor medio de 0,077 kg, en 5 días, a 20°C de DBO por persona y día. El equivalente de población de un matadero, por ejemplo, oscilará entre 5 y 25 PE por animal.

La composición de las infiltraciones depende de la naturaleza de las aguas subterráneas que penetran en la canalización. El agua de lluvia residual contiene concentraciones significativas de bacterias, elementos traza, petróleo y productos químicos orgánicos.

6.- ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

Una estación depuradora de aguas residuales (EDAR), es una instalación en la cual, con el auxilio de diversos equipos mecánicos, eléctricos e hidráulicos, se llevan a cabo en menor tiempo y en un espacio más reducido, procesos similares a los realizados naturalmente, liberando el agua residual de los elementos extraños que lleva incorporados hasta alcanzar un determinado nivel de pureza. Este tratamiento comprende varios procesos básicos:

- 1. Pre-tratamiento:** tiene como objetivo eliminar de las aguas residuales todos aquellos elementos de diferente tamaño, que por su acción mecánica, pueden afectar al funcionamiento del sistema depurador, así como las arenas y elementos

minerales que pueden originar sedimentaciones y/o abrasiones a lo largo de las conducciones o elementos mecánicos de la instalación.

Un conjunto de rejas, finas y gruesas, con mayor o menor separación, constituye el mecanismo para conseguir el desbaste de los materiales arrastrados por el agua residual. Los desarenadores son básicamente canales en los que se reduce la velocidad del agua, permitiendo la sedimentación de las partículas más pesadas. El desengrasado es el tratamiento que tiene por objeto la eliminación de las grasas y aceites libres, los cuales, al ser menos densos que el agua, forman una película superficial que puede ser eliminada por mecanismos de recogida superficial.

2. **Tratamiento primario:** tiene como objetivo la eliminación, por medios físicos, de los sólidos en suspensión no eliminados en el pre-tratamiento. El proceso se realiza en unos tanques, llamados decantadores primarios, rectangulares o circulares, que disponen de mecanismos de arrastre y extracción de los fangos depositados en el fondo y rasquetas superficiales para recuperar las materias flotantes y espumas. En algunos casos se incluye, dentro del tratamiento primario, el llamado proceso físico-químico, en el cual, mediante la adición de determinados compuestos químicos, se consigue la floculación de los coloides, elementos cargados eléctricamente, y la neutralización, proceso en el que se consigue el pH adecuado para el resto de operaciones de tratamiento.



3. **Tratamiento secundario:** una vez eliminados de un 40 a un 60% de los sólidos en suspensión y reducida de un 20 a un 40% la DBO₅ por medios físicos en el tratamiento primario, el tratamiento secundario reduce la cantidad de materia orgánica no biodegradable que no se ha conseguido eliminar en el tratamiento anterior; esto se logra mediante el desarrollo de microorganismos capaces de asimilar dicha materia orgánica. En definitiva, se trata de aplicar, de manera controlada, las leyes naturales de la auto-depuración mediante un proceso biológico seguido de una decantación, llamada secundaria. El tratamiento secundario puede llevarse a cabo por distintos procedimientos, siendo los más usuales:

- ✚ **Biológico:** la materia orgánica causante de la contaminación se emplea como sustrato alimenticio para el metabolismo de microorganismos, que reducen así la carga contaminante, además de separar por decantación la masa biológica del agua tratada. La aportación de oxígeno se realiza por aireación forzada. Los microorganismos se mantienen en suspensión mediante diversas formas de agitación, generando una masa homogénea (fangos activados, estanques de estabilización, canales de oxidación, aireación prolongada).
- ✚ **Biomasa fija:** los microorganismos se adhieren a unos soportes, generando una película biológica que consume la materia orgánica y se desprende en forma de flóculos decantables (biodiscos, biotambores, lechos bacterianos).

Cualquiera que sea el proceso utilizado, la mezcla de agua residual y fangos, conocida como "licor mezcla", se conduce a unos decantadores para la separación, por sedimentación floculenta, del fango y del agua depurada. Una parte del fango se vuelve a introducir en el proceso biológico, constituyendo la llamada recirculación de fangos, evacuándose el resto al sistema de tratamiento de fangos.

4. **Tratamiento terciario:** el efluente de un tratamiento secundario puede estar todavía insuficientemente depurado para determinados usos, siendo precisa una serie de procesos que se agrupan bajo el nombre de tratamiento terciario. Este se lleva a cabo para eliminar fundamentalmente la materia orgánica que no ha sido retenida en el tratamiento biológico, o bien que no es biodegradable, y las sales inorgánicas disueltas, entre las que destacan el nitrógeno y el fósforo, que son dos de los máximos responsables de la eutrofización de los cursos y depósitos de agua.
5. **Tratamiento de fangos:** en un tratamiento biológico de aguas residuales, se obtienen considerables volúmenes de fangos que requieren un tratamiento específico, estando compuesto, generalmente, por los siguientes procesos:
 - ✚ **Espesamiento previo:** el objetivo del espesamiento de fangos es el de concentrarlos para hacerlos más densos, reduciendo el volumen para facilitar su manejo y abaratar los costes.
 - ✚ **Digestión:** tiene por objeto degradar la materia orgánica presente en los fangos y puede llevarse a cabo por vía aerobia o anaerobia. Cuando la digestión es anaerobia se produce un gas biológico o bio-gas, con un contenido de metano del 65-70%. Este puede ser reutilizado para suministrar parte de la energía que la planta depuradora necesita.
 - ✚ **Secado:** una vez digeridos, los fangos deben someterse a un proceso de secado a fin de reducir su volumen y facilitar su manejo, obteniéndose una pasta con un contenido de aproximadamente un 30% de materia sólida.
 - ✚ **Eliminación:** existen varias posibilidades de eliminación de fangos: descarga en vertedero, incineración, aplicación en la agricultura u otros usos.

Si bien se emplean soluciones de todo tipo, la tendencia más generalizada está en el empleo de estos fangos para usos agrícolas.

7.- TRATAMIENTOS AVANZADOS: EL OZONO Y LA REUTILIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL

Si el agua que ha de recibir el vertido requiere un grado de tratamiento mayor que el que puede aportar el proceso terciario porque el efluente va a reutilizarse, es necesario un tratamiento avanzado de las aguas residuales. A menudo se usa el término tratamiento terciario como sinónimo de tratamiento avanzado, pero no son exactamente lo mismo.

El tratamiento terciario, o de tercera fase, suele emplearse básicamente, como hemos indicado, para eliminar sales inorgánicas, mientras que el tratamiento avanzado incluye pasos adicionales para mejorar la calidad del efluente eliminando los contaminantes

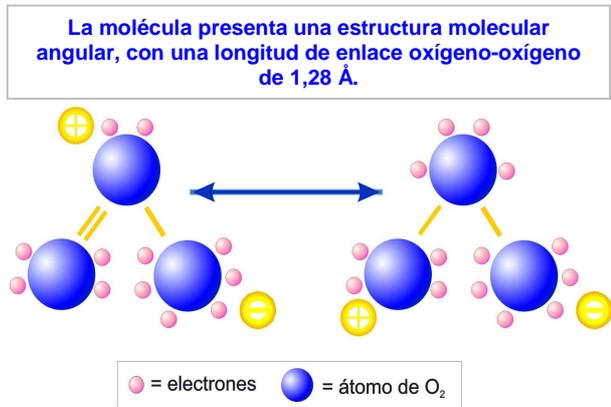
recalcitrantes. Hay procesos que permiten eliminar más de un 99% de los sólidos en suspensión y reducir la DBO_5 en similar medida. Los sólidos disueltos se reducen por medio de procesos como la ósmosis inversa y la electrodiálisis. La eliminación del amoníaco, la desnitrificación y la precipitación de los fosfatos pueden reducir el contenido en nutrientes. Si se pretende la reutilización del agua residual, la desinfección por tratamiento con ozono es considerada el método más fiable.

Es probable que en el futuro se generalice el uso de estos y otros métodos de tratamiento de los residuos a la vista de los esfuerzos que se están haciendo para conservar el agua mediante su reutilización.

7.a.- QUÉ ES EL OZONO

Desde el punto de vista químico, el ozono es una forma alotrópica del oxígeno, formada por tres átomos de este elemento, cuya función más conocida es la de protección frente a la peligrosa radiación ultravioleta del sol; pero también es un potente oxidante y desinfectante con gran variedad de utilidades. La más destacada es la desinfección de aguas.

Es, después del flúor, el compuesto más oxidante, debido a su facilidad para captar electrones. De rápida descomposición y, a igualdad de condiciones, más estable en agua que en aire.



Se trata de un gas azul pálido e inestable, que a temperatura ambiente se caracteriza por un olor picante, perceptible a menudo durante las tormentas eléctricas, así como en la proximidad de equipos eléctricos, según evidenció el filósofo holandés Van Marun en el año 1785. A una temperatura de $-112^{\circ}C$ condensa a un líquido azul intenso. En condiciones normales de presión y temperatura, el ozono es trece veces más soluble en agua que el oxígeno, pero debido a la mayor concentración de oxígeno en aire, éste se encuentra disuelto en el agua en mayor medida que el ozono.



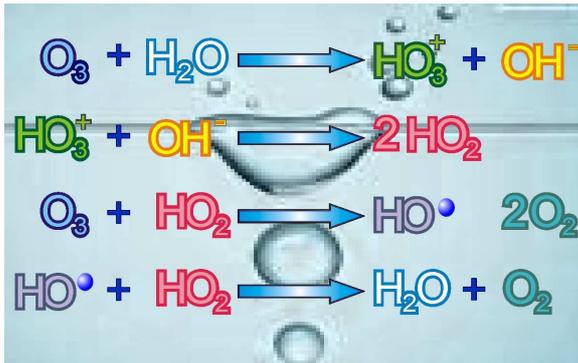
Debido a la inestabilidad del compuesto, éste debe ser producido en el sitio de aplicación mediante unos generadores. El funcionamiento de estos aparatos es sencillo: pasan un flujo de oxígeno a través de dos electrodos. De esta manera, al aplicar un voltaje determinado, se provoca una corriente de electrones en el espacio delimitado por los electrodos, que es por el cual pasa el gas. Estos electrones provocarán la disociación de las moléculas de

oxígeno que posteriormente formarán el ozono.

7.b.- MECANISMO DE ACCIÓN

Cuando este gas es inyectado en el agua, puede ejercer su poder oxidante mediante dos mecanismos de acción:

1. Oxidación directa de los compuestos mediante el ozono molecular.
2. Oxidación por radicales libres hidroxilo.



Reacciones de formación de radicales libres OH[•]

Estos radicales libres, generados en el agua por combinación de ésta con las moléculas de ozono, constituyen uno de los más potentes oxidantes, con un potencial de 2,80 V. No obstante, presentan el inconveniente de que su vida media es del orden de microsegundos, aunque la oxidación que llevan a cabo es mucho más rápida que la oxidación directa por moléculas de ozono.

De los oxidantes más utilizados en el tratamiento de aguas, los radicales libres de hidroxilo y el ozono tienen el potencial más alto (son los más oxidantes). Ello explica la gran eficacia del ozono como desinfectante, así como su capacidad para oxidar materia orgánica del agua, eliminar olores y sabores desagradables, y degradar compuestos químicos de diversa naturaleza.

Dependiendo de las condiciones del medio, puede predominar una u otra vía de oxidación:

- ✚ En condiciones de bajo pH, predomina la oxidación molecular.
- ✚ Bajo condiciones que favorecen la producción de radicales hidroxilo, como es el caso de un elevado pH, exposición a radiación ultravioleta, o por adición de peróxido de hidrógeno, empieza a dominar la oxidación mediante hidroxilos.



7.c.- DESINFECCIÓN

A lo largo de los distintos tratamientos de una EDAR se produce una notable disminución del contenido de gérmenes patógenos en el agua residual. Sin embargo, como hemos señalado, suele ser necesario complementar el tratamiento con una desinfección si se pretende reutilizar el efluente.

La desinfección tiene como objetivo la destrucción selectiva de bacterias y virus patógenos presentes en el agua residual, utilizándose cuando la masa de agua receptora puede tener un uso recreativo, de baño, o incluso de abastecimiento. Se realiza mediante la adición de productos químicos como cloro, bromo, yodo o permanganato potásico, lo cual puede entrañar una serie de riesgos para el medio receptor por lo que dichos productos deben utilizarse con precaución.

De hecho, el agente de más amplio uso es el cloro, que presenta graves desventajas no sólo en lo que al medio concierne, sino también en lo que respecta a cuestiones de Salud Pública. Así, si el agua a desinfectar con cloro o sus derivados contiene materias orgánicas o contaminantes químicos, se pueden originar compuestos tóxicos o que menoscaban las características organolépticas del agua:



Por ejemplo, las cloraminas comunican al agua olores y están consideradas como posibles agentes cancerígenos; los clorofenoles confieren al agua olores y sabores medicamentosos; los trihalometanos empiezan a alcanzar niveles preocupantes en el agua de consumo y cada vez parece más plausible que posean efectos cancerígenos, al igual que los PCBs, de probado carácter cancerígeno, etc.

Lo más seguro para la consecución de una desinfección óptima sin subproductos tóxicos, es el tratamiento con ozono, reconocido como desinfectante en la potabilización de aguas en los países más avanzados y comprometidos con el medio, entre ellos el nuestro, estando recogido su uso por el Ministerio de Sanidad y Consumo.²

La base de la acción bactericida de cualquier agente suele ser la oxidación de componentes fundamentales para la supervivencia de los microorganismos. La capacidad de oxidar con mayor o menor facilidad dichas estructuras marca la diferencia, en cuanto a eficacia, de los distintos compuestos utilizados normalmente en desinfección. Como hemos visto, el ozono es, dentro de los compuestos normalmente utilizados en desinfección de aguas, el que presenta una mayor capacidad oxidante, lo que quiere decir mayor eficiencia biocida.

La eficacia del ozono como desinfectante está de sobra probada, habiéndose evidenciado que es capaz de destruir esporas de *Bacillus subtilis*, la forma más resistente de los microorganismos.

² Ver apartado de "Toxicología"

De hecho, el ozono es efectivo frente a gran número de microorganismos sobre los que actúa con gran rapidez, a bajas concentraciones y en un amplio rango de pH, debido a su alto potencial de oxidación.

La oxidación directa de la pared celular constituye su principal modo de acción. Esta oxidación provoca la rotura de dicha pared, propiciando así que los constituyentes celulares salgan al exterior de la célula. Asimismo, la producción de radicales hidroxilo como consecuencia de la desintegración del ozono en el agua, provoca un efecto similar al expuesto.

Los daños producidos sobre los microorganismos no se limitan a la oxidación de su pared: el ozono también causa daños a los constituyentes de los ácidos nucleicos (ADN y ARN), provocando la ruptura de enlaces carbono-nitrógeno, lo que da lugar a una despolimerización. Los microorganismos, por tanto, no son capaces de desarrollar inmunidad al ozono como hacen frente a otros compuestos.

Microorganismos estudiados frente a los cuales es efectivo el ozono

<p>ALGAS</p> <p><i>Chlorella vulgaris</i></p> <p>BACTERIAS (I)</p> <p><i>Achromobacter</i> <i>Aeromonas hydrophilia</i> <i>Agrobacterium tumefaciens</i> <i>Bacillus anthracis</i> <i>Bacillus megaterium</i> (esporas y vegetativa) <i>Bacillus mesentericus</i> <i>Bacillus paratyphosus</i> <i>Bacillus spores</i> Bacillus subtilis (esporas y vegetativa) <i>Clostridium tetani</i> <i>Corynebacterium diphtheriae</i> <i>Eberthella typhosa</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Legionella bozemanii</i> <i>Legionella dumoffii</i> <i>Legionella gormanii</i> <i>Legionella longbeachae</i> <i>Legionella micdadel</i> <i>Legionella pneumophila</i> <i>Leptospira canicola</i> <i>Leptospira interrogans</i> <i>Micrococcus candidus</i> <i>Micrococcus sphaeroides</i> <i>Mycobacterium avium</i> complex <i>Mycobacterium leprae</i> <i>Mycobacterium tuberculosis</i> <i>Neisseria catarrhalis</i> <i>Norcardia corallina</i> <i>Phytomonas tumefaciens</i> <i>Proteus vulgaris</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Rhodospirillum rubrum</i> <i>Salmonella enteritidis</i> <i>Salmonella paratyphi</i></p>	<p>BACTERIAS (II)</p> <p><i>Salmonella typhimurium</i> <i>Salmonella typhosa</i> <i>Sarcina lutea</i> <i>Serratia marcescens</i> <i>Shigella dysenteriae</i> <i>Shigella flexneri</i> <i>Shigella paradysenteriae</i> <i>Shigella sonnei</i> <i>Spirillum rubrum</i> <i>Staphylococcus albus</i> <i>Staphylococcus aureus</i> <i>Staphylococcus epidermidis</i> <i>Staphylococcus faecalis</i> <i>Streptococcus hemolyticus</i> <i>Streptococcus lactis</i> <i>Streptococcus salivarius</i> <i>Streptococcus viridans</i> <i>Vibrio cholerae</i> <i>Vibrio comma</i></p> <p>HONGOS</p> <p><i>Microsporon audoaini</i> <i>Microsporon lenosum</i> <i>Monilia albicans</i> <i>Trichophyton</i> <i>Mentagrophytes</i> <i>Trichophyton purpureum</i></p> <p>ESPORAS DE HONGOS</p> <p><i>Aspergillus flavus</i> <i>Aspergillus glaucus</i> <i>Aspergillus niger</i> <i>Clostridium perfringens</i> <i>Mucor racemosus A</i> <i>Mucor racemosus B</i> <i>Oospora lactis</i> <i>Penicillium digitatum</i> <i>Penicillium expensum</i> <i>Penicillium roqueforti</i> <i>Rhizopus nigricans</i></p>	<p>NEMÁTODOS</p> <p>Huevos</p> <p>PARÁSITOS</p> <p><i>Cryptosporidium</i> <i>Giardia lamblia</i></p> <p>PROTOZOOS</p> <p><i>Paramecium</i> (Patógenas y no patógenas)</p> <p>VIRUS</p> <p><i>Adenovirus</i> <i>Bacteriophage</i> <i>Coliphage</i> <i>Corona</i> <i>Coxsackie</i> <i>Cytomegalovirus</i> <i>Echovirus</i> <i>Epstein Barr</i> <i>Flavivirus</i> <i>Herpes</i> (todos los tipos) <i>Hepatitis</i> <i>Influenza</i> <i>Orthomyxoviridae</i> <i>Paramyxoviridae</i> <i>Poliomiellitis</i> <i>Retroviridae</i> (VIH) <i>Rhabdoviridae</i> (Rabia) <i>Rotavirus</i> <i>Syphilis</i> <i>Tobacco mosaic</i> <i>Toga</i></p> <p>LEVADURAS</p> <p>Levadura de panadería <i>Candida</i> (todas las formas) <i>Saccharomyces cerevisiae</i> <i>Saccharomyces var.</i> <i>Ellipsoideus</i> <i>Saccharomyces sp.</i></p>
---	--	---

7.d.- OXIDACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

El desarrollo de plancton en las paredes de conductos y depósitos de agua se conoce como película biológica o biocapa; está compuesta por microorganismos, materia orgánica, residuos y materia inerte, que constituyen un hábitat idóneo para los microorganismos, proporcionándoles alimento y protección frente a los desinfectantes, por lo que actúa como reservorio de bacterias y protozoos.

Otra consecuencia de la película biológica es que puede ser responsable de la corrosión del sistema. Esta corrosión se produce cuando los microorganismos que la integran (bacterias ferruginosas o sulfato-reductoras) producen compuestos metabólicos como el SH₂, que causan corrosiones importantes en el metal; se aprecia entonces una elevación del contenido en hierro del agua.

La película biológica, asimismo, constituye un lecho ideal para que se acumulen diversos minerales dando lugar a incrustaciones, que en casos extremos pueden llegar a obstruir los conductos del agua.

Una ozonización elimina todos estos inconvenientes, al ser capaz de destruir, tanto a las bacterias y demás microorganismos, como la materia orgánica que les sirve de sustento.

7.e.- OXIDACIÓN DE MATERIA INORGÁNICA

El ozono, gracias a su alto potencial redox, además de proporcionar una eficaz desinfección y reducir la DBO₅, es capaz de eliminar compuestos como cianuros y fenoles, precipitar el hierro y el manganeso, mejorar los caracteres organolépticos del agua (olor, aspecto y sabor) y favorecer la nitrificación (oxida los nitritos, compuestos tóxicos para la fauna acuática, a nitratos.)

En el caso de pretender utilizarse un agua residual terciaria, por ejemplo, para el llenado de acuíferos de uso estético (uno de los usos con requisitos de calidad menos restrictivos), el tratamiento avanzado con ozono eliminaría los problemas de olores desagradables o eutrofización, además de garantizar la ausencia de microorganismos indeseables y potencialmente peligrosos para la salud humana (*Legionella*.)



8.- TOXICOLOGÍA

En cuanto a su ficha toxicológica, el ozono está clasificado únicamente como AGENTE IRRITANTE X_i en aire, no estando clasificado como carcinogénico.

- Esta clasificación como agente irritante se refiere **exclusivamente a sus concentraciones en aire**, es decir, a los problemas derivados de su inhalación, que dependen de la concentración a la cual las personas están expuestas, así como del tiempo de dicha exposición.

La normativa emitida por la OMS recomienda una concentración máxima de ozono en aire, para el público en general, de 0,05 ppm (0,1 mg/m³).

Salvo que se almacene líquido a altas presiones, el ozono es generado *in situ*, no pudiendo existir escapes superiores a la producción programada en los generadores, ya que estos únicamente producen el gas, no lo acumulan. Los valores para producir efectos agudos letales son muy altos, de 15 ppm, concentraciones prácticamente inalcanzables en tratamientos convencionales.

- Disuelto **en agua, el ozono resulta completamente inocuo**, dado que su acción sobre la materia orgánica provoca su rápida descomposición. Únicamente en el caso de tratamientos a altas presiones podría producirse la liberación de ozono al aire, apareciendo entonces en la superficie de intercambio agua-aire concentraciones que podrían considerarse peligrosas; **pero los tratamientos convencionales no se**



realizan en estas condiciones. De hecho, **el ozono se encuentra autorizado como coadyuvante en el tratamiento de aguas potables** según la resolución de 23 de Abril de 1984 del Ministerio de Sanidad y Consumo (BOE Núm. 111 de 9 de Mayo del mismo año), estando asimismo reconocido como desinfectante en la potabilización de aguas por la norma UNE-EN 1278:1999. En palabras textuales de la norma española:

“El ozono se auto-descompone en el agua. Por tanto, a las dosis habitualmente aplicadas, no se requiere generalmente ningún proceso de eliminación. [...]”

Asimismo, el real decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, incluye el ozono como *sustancia para el tratamiento del agua*, ya que cumple con la norma UNE-EN correspondiente y en vigencia (incluida en el Anexo II del RD, *normas UNE-EN de sustancias utilizadas en el tratamiento del agua de consumo humano*: UNE-EN 1278:1999- Ozono).



Por otra parte, en el *Codex Alimentarius*, el ozono viene definido por tener un uso funcional en alimentos como agente antimicrobiano y desinfectante, tanto del agua destinada a consumo directo, del hielo, o de sustancias de consumo indirecto, como es el caso del agua utilizada en el tratamiento o presentación del pescado, productos agrícolas y otros alimentos perecederos.

A pesar de esta definición y de que desde varios años antes este compuesto se consideraba como **seguro para alimentos** (GRAS: Generally Recognized as Safe), no fue hasta el año 2001 cuando la FDA (Administración Americana de Alimentos y Drogas), lo **incluyó como agente antimicrobiano de uso alimentario**. Esta autorización permite que el ozono pueda ser utilizado en forma gaseosa o líquida en el tratamiento, almacenaje y procesado de alimentos, incluyendo carne y pollo.

9.- NORMATIVA

El uso del ozono está regulado según sus usos, encontrándose incluido en:

-  **Real Decreto 140/2003**, de 7 de Febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
-  **Norma española UNE-EN 1278:1999** de productos químicos utilizados en el tratamiento del agua destinada a consumo humano: Ozono, transposición de la Norma Europea EN 1278 de Septiembre de 1998.
-  **Real Decreto 865/2003**, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis.
-  **NTP 538 del INSHT**. Legionelosis: medidas de prevención y control en instalaciones de suministro de agua.

- ✚ **Norma española UNE 400-201-94**, recomendaciones de seguridad en generadores de ozono para tratamiento de aire.
- ✚ **Real Decreto 168/1985**, de 6 de febrero, por el que se aprueba la reglamentación técnico-sanitaria sobre condiciones generales de almacenamiento frigorífico de alimentos y productos alimentarios.

10.- CONCLUSIONES

Los tratamientos avanzados con ozono para aguas residuales, permiten que estas presenten las características requeridas para usos tan diversos como el agrícola, pecuario, estético, recreacional, o industrial.

El agua ha sido, desde el comienzo de los tiempos, la llave para la civilización y el desarrollo, siendo un recurso natural fundamental y uno de los pilares básicos en los que se apoya el progreso. No es por tanto exagerado decir que uno de los problemas más graves de conservación a los que se enfrenta hoy la humanidad es el de preservar y mantener la calidad de las aguas naturales, racionalizando su consumo y minimizando el deterioro de los cauces receptores de nuestras aguas residuales.



Es, pues, urgente que se generalicen los tratamientos de aguas residuales con vistas a su reutilización, a la vez que se restringe el uso de productos químicos como el cloro, altamente contaminantes, ya que de otro modo el deterioro progresivo de la calidad del agua puede llegar a tocar techo.

11.- BIBLIOGRAFÍA

- ✚ **Directiva 91/271/CEE** del Consejo, de 21 de mayo de 1991, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- ✚ **Practical Manual of Wastewater Chemistry.** Hauser, B.A., Lewis Publishers, Inc. 1996.
- ✚ **Aguas residuales urbanas: Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento.** Seoanez Calvo, M. Ed. 1995.
- ✚ **Industrial Wastewater Treatment: A Guidebook.** Edwards J.D.,. Lewis Publishers, Inc., 1995.
- ✚ **Modern techniques in water and wastewater treatment.** Kolarik y Priestley ec., 1995.
- ✚ **Depuradoras de Madrid: tecnologías y arquitectura técnica en el Canal de Isabel II.** Sarabia, A.; Aguiló, M. Madrid, Canal de Isabel II, 1995.
- ✚ **Residuos Urbanos y Medio Ambiente.** (U.A.M. ed), I. Herráez, J. López, L. Rubio y M.E. Fernández. 1989.