

TEMA 5.- Parámetros indicativos y Criterios de Calidad.

5.1.- Parámetros Generales Indicativos de Contaminación.

5.2.- Características Microbiológicas.

5.3.- Depuración de aguas.

5.4.- Prevención de la Contaminación del Agua.

5.1.- Parámetros Generales Indicativos de Contaminación.

Para llevar a cabo un estudio de los diferentes parámetros que nos indican el grado de contaminación ó índice de calidad de las aguas se procede a llevar a cabo una clasificación de los mismos en función de la naturaleza de las propiedades o componentes que se analizan.

- ***Parámetros de carácter físico.***
 - Características organolépticas.
 - Turbidez y materia en suspensión.
 - Temperatura.
 - Conductividad.
- ***Parámetros de carácter químico.***
 - Salinidad y dureza.
 - Valor del pH.
 - Oxígeno disuelto.
 - Medidores de materia orgánica: DBO y DQO.
 - Medidores de especies inorgánicas: Cationes, aniones, metales, etc.
- ***Parámetros de carácter radiactivo.***
 - Radiaciones α y β totales.
 - Elementos individuales.
- ***Parámetros de carácter microbiológico.***
 - Bacterias y virus.
 - Hongos.
 - Algas.

Veamos algunas de ellas de forma más detallada:

Parámetros de carácter físico: Características organolépticas.

Color.

La coloración que puede presentar un “*agua natural no contaminada*” esta determinada por los siguientes factores:

- Sustancias húmicas, ácidos tánicos, hojas y turba (estas sustancias son las que confieren un color café amarillento o pardo el agua).
- Sales de hierro (zonas graníticas o silíceas que confieren un color rojizo o pardo).
- Macizos calcáreas (confieren un color verdoso).

- Macizos no calcáreos (confieren un color amarillento).

En el agua podemos distinguir entre el *color aparente*, que es color que presenta un agua bruta, en contraposición al llamado *color verdadero* que es el color que presentaría una vez que se haya eliminado toda la materia en suspensión. Además se puede distinguir entre el *color interno* que es el color que presenta debido a los materiales disueltos, dispersos o suspendidos en su seno, y el *color externo* que es el que presenta como resultado de la absorción de radiación electromagnética de mayor longitud de onda.

Las aguas residuales urbanas recientes pueden presentar un color gris, el cual puede ser debido a la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos, así como residuos de colorantes industriales y aceites. Con el tiempo este color gris pasa a un color oscuro pudiendo llegar a ser negro.

La coloración del agua se puede medir por comparación con un patrón que consiste en una disolución de los metales Pt-Co y en consecuencia se mide en unidades de Pt-Co.

Sabor y olor.

Desde el punto de vista del sentido del gusto podemos decir que existen cuatro sabores fundamentales que son: *ácido, salado, amargo y dulce*. En la mayoría de los casos el sabor se debe a las impurezas disueltas, fundamentalmente de naturaleza orgánica, así como de los productos de descomposición biológica de los mismos. Los olores suelen ser mucho más específicos que los sabores y por ello, conociendo la causa del olor se pueden llevar a cabo métodos de análisis más específicos.

Hay que tener en cuenta que se trata de dos propiedades muy subjetivas y por lo tanto difíciles de medir. A su vez, las fuentes del olor y el sabor pueden ser de origen natural o artificial. Los compuestos inorgánicos suelen ser inodoros, excepto gases como el cloro, H₂S, NH₃ y derivados, los cuales suelen tener olores muy característicos. En lo que respecta a los sabores los compuestos inorgánicos suelen ser ácidos, salados y en su caso metálico.

Los compuestos orgánicos, por el contrario, presentan una amplia variedad de olores y sabores al igual que muchos organismos vivos como pueden ser las algas, bacterias y hongos. También producen olores muy característicos la descomposición de vegetales y animales. Son también muy característicos los olores y sabores de las aguas residuales domésticas y los procedentes de vertidos industriales.

La valoración de los olores debe ser llevado a cabo por un grupo de 5 personas (con un mínimo de 2), que deben establecer una escala comparativa tomando como referencia el olor de una muestra en frío (a 25°C) y en caliente (a 60°C) y se establece una clasificación entre sustancias olorosas y sustancias ionodoras y se realizan las diluciones intermedias que se precisen. Se toma como referencia el valor límite de apreciación de olor que deberá corresponder a la muestra más diluida que da un olor perceptible, y se asignan números.

Para determinar los sabores se procede cogiendo el agua a examinar y se diluye en agua sin gusto (se prepara con agua potable filtrada con carbón activo). Se inicia la cata empezando por las muestras más diluidas hasta que se observa la aparición de sabor. Este proceso debe efectuarse a 30°C y por un mínimo de tres personas.

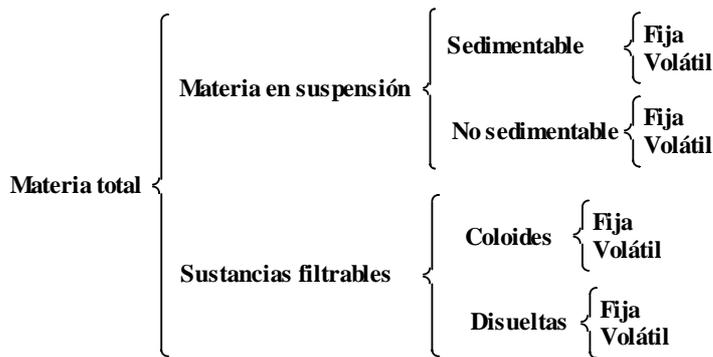
Turbidez.

Se trata de un fenómeno óptico que consiste de hecho en una medida de la absorción o dispersión de la luz por parte de la materia que se encuentra en suspensión en el agua, y que puede proceder de los procesos de escorrentía superficial y también de los vertidos urbanos e industriales. Las medidas se suelen hacer empleando un dispositivo llamado *turbidímetro* y se mide en unidades nefelométricas NTU (se emplean las abreviaturas UNF ó FTU cuando se emplea como patrón la formicina. Antiguamente se empleaba como unidad mg de SiO₂/l.

La turbidez del agua es debida a la presencia en su seno de diferentes tipos de partículas como arcillas, microorganismos, fibras vegetales ó cieno. La propiedad opuesta es la “*transparencia*” y que viene dada por la profundidad en metros a la cual deja de observarse un disco Secchi, de unas determinadas características.

Sólidos en suspensión.

Los sólidos presentes en el agua lo pueden hacer en disolución y/o en suspensión y de acuerdo con las características de su naturaleza en orgánicos e inorgánicos. Los sólidos en suspensión se separan del agua que los contiene por filtración y teniendo en cuenta que los coloides puede pasar a través del filtro, podemos dividirlos en sólidos totales, residuo filtrable y residuo no filtrable. Todas las materias (sólidas y líquidas) presentes en el agua podemos en la siguiente forma:



El término fijo engloba a aquella materia de naturaleza inorgánica (normalmente poco volátiles) y el término volátil se refiere a compuestos de naturaleza orgánica.

La presencia de *materia en suspensión* puede producir los siguientes efectos:

- Produce color aparente en el agua.
- Disminuye el paso de energía solar, afectando al proceso fotosintético.
- Provoca la formación de depósitos sobre plantas acuáticas y en las branquias de los peces.
- Formación de depósitos por sedimentación, favoreciendo la aparición de condiciones anaeróbicas y dificultando la alimentación de los seres vivos acuáticos.

La *materia filtrable* puede producir los siguientes efectos:

- Aumenta la salinidad.
- Varía la solubilidad del oxígeno.
- La presencia de ciertos compuestos puede inducir toxicidad.

Para medir la variedad de formas posibles en las que se pueden encontrar las sustancias en el agua, se hace uso de los siguientes parámetros:

- **Sólidos decantables (ml/l).**- Se deja en reposo durante una hora un litro de agua en un cono *Imhoff* y se mide el volumen de sólidos decantados en el fondo.
- **Materia en suspensión (MES) ó Sólidos en suspensión (SS).**- Es la cantidad de materia retenida en un filtro cuando se hace pasar agua a su través. Se mide en mg/l (ppm).
- **Residuo seco a 105°C, ó Total de sólidos disueltos (TSD).**- Una vez que el agua ha sido filtrado se evapora en una estufa a 105°C durante 4 horas y se pesa la cantidad de residuo que permanece en mg/l (ppm). De esta forma se determinaría toda la sustancia disuelta y coloidal.

- **Residuo fijo (mg/l).**- Se calienta el residuo seco hasta los 525°C, que es la temperatura a la cual se supone que se ha volatilizado la materia orgánica. Es una medida de la materia mineral disuelta en el agua.

$$\text{Materia orgánica disuelta} = \text{TSD} - \text{residuo fijo}$$

Temperatura.

Es una variable física cuya influencia en la calidad del agua viene determinada por su efecto sobre:

- La solubilidad de gases y sales.
- Cinética de las reacciones químicas y bioquímicas.
- Desplazamiento de los equilibrios químicos.
- Tensión superficial.
- Desarrollo de organismos presentes en el agua.

Un aumento de la temperatura supone una disminución de la cantidad de oxígeno disuelto (disminuye la solubilidad según la Ley de Henry) y una aceleración de los procesos de putrefacción.

Conductividad.

Es una medida de la resistencia que ofrece el agua al paso de la corriente eléctrica entre dos electrodos impolarizables sumergidos en la misma. Este dato nos da información acerca de la concentración de iones en disolución. Así, una conductividad elevada puede ser indicio de una elevada salinidad ó de valores anómalos del pH. Las medidas se realizan en celdas de 1 cm de espesor y las unidades son el *Siemen* (S) y la conductividad se suele expresar en S/cm. En aguas muy mineralizadas se emplearía el mS/cm y en aguas poco mineralizadas en $\mu\text{S/cm}$.

$$\text{Residuo seco (g/l)} = 0,86 \cdot 10^3 \times \text{conductividad específica (ohmio}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$$

Parámetros de carácter químico.

Salinidad.

Es una expresión del contenido iónico total del agua. El aumento de la salinidad en aguas no marinas es causada por:

- Efluentes industriales.
- Escorrentía de las aguas de regadío.
- Aguas salobres de las minas.

- Intrusión de agua marina en el nivel freático.
- Depósitos de aerosoles salinos oceánicos.

Y los principales problemas que ocasiona son:

- Alteraciones en la vida acuática.
- Problemas en los regadíos.
- Aguas no aptas para beber.

Como referencia, las aguas de mar suelen tener un valor medio de 35 g/Kg. Veamos una tabla de la influencia de la salinidad en las cosechas.

Total de sólidos disueltos (mg/l)	Respuesta de las cosechas
< 500	No se observan en efectos perjudiciales.
500-1.000	Posibles efectos perjudiciales en cultivos sensibles.
1.000-2.000	Efectos nocivos sobre muchas cosechas, se precisan prácticas cuidadosas para su empleo.
2.000-5.000	Sólo puede utilizarse en plantas tolerantes a la sal en suelos permeables y además se precisa prácticas cuidadosas para su empleo.

Dureza.

Es una medida de la presencia de cationes alcalino-térreos mayoritarios como Ca^{2+} y Mg^{2+} , así como de otros metales menos abundantes como son el Fe^{2+} y Mn^{2+} . Se suelen utilizar las siguientes expresiones:

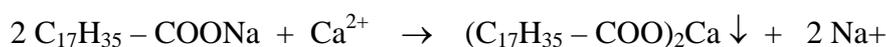
Dureza total.- Es la suma total de las concentraciones de sales de Ca y Mg. Se suele utilizar volumetría de complejación con EDTA, expresándose como mg de CaCO_3/l . A nivel industrial se sigue utilizando los llamados *grados hidrotimétricos* (1° Francés = 10 mg de CaCO_3/l).

Dureza temporal.- Esta determinada por la presencia de hidrogenocarbonatos de Ca y Mg. Desaparece por ebullición mediante la precipitación de los carbonatos.

Dureza permanente.- Se mide después de someter el agua al proceso de ebullición y es igual a la diferencia entre los dos conceptos anteriores.

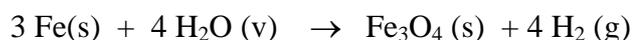
$$\text{Dureza permanente} = \text{Dureza total} - \text{Dureza temporal}$$

La utilización de aguas duras en los procesos de lavado puede producir problemas por la formación de sales insolubles.



También se puede formar depósitos de carbonatos o sulfatos insolubles en tuberías, cañerías y objetos de cocina. A nivel industrial uno de los mayores problemas es la formación de incrustaciones en las calderas, ya que la ebullición del agua provoca la

formación de depósitos de sales poco solubles como CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 y CaSO_4 , que determina un mayor consumo de combustible para calentamiento de agua. También se pueden producir procesos de oxidación-reducción.



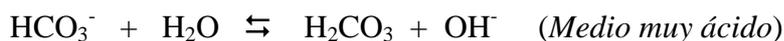
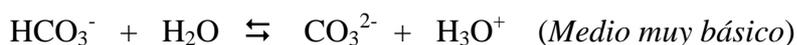
Valor del pH: Alcalinidad y acidez.

Se determina mediante un pHmetro y nos proporciona una información sobre los procesos químicos y biológicos, naturaleza de las especies iónicas presentes, el potencial redox del agua, etc. Es un buen indicador para determinar la calidad de un agua. Las aguas naturales tienen cierto carácter básico con un pH comprendido entre 6,5 y 8,5. El valor del pH del agua de los océanos es 8.

Alcalinidad.- es la cantidad de iones del agua que reaccionan con los iones H^+ para neutralizarlos. Se determina mediante una volumetría de neutralización ácido-base y se expresa como mg de CaCO_3/l (ppm de CaCO_3). Es consecuencia de la presencia en el agua de iones HCO_3^- , CO_3^{2-} e hidróxido principalmente.



Estos pares ácido-base pueden actuar como amortiguadores que pueden regular el pH por pérdida o ganancia de protones. Según las características del medio se pueden establecer los siguientes equilibrios:

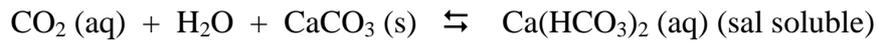


En el agua de mar, al igual que en muchos sistemas de agua dulce, el par amortiguador más importante es el sistema $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$.

El grado de alcalinidad del agua es un factor a tener en cuenta a la hora de determinar la agresividad hacia ciertos materiales (hormigones, cementos, calizas) o la tendencia a formar incrustaciones por parte del agua, lo cual a su vez depende fundamentalmente de tres factores:

- Cantidad de CO_2 libre.
- Alcalinidad.
- Valor del pH.

Se entiende por CO_2 en equilibrio a la cantidad de este compuesto que en estado libre es necesario para evitar la precipitación como carbonatos de los hidrogenocarbonatos presentes en un agua según el siguiente equilibrio:

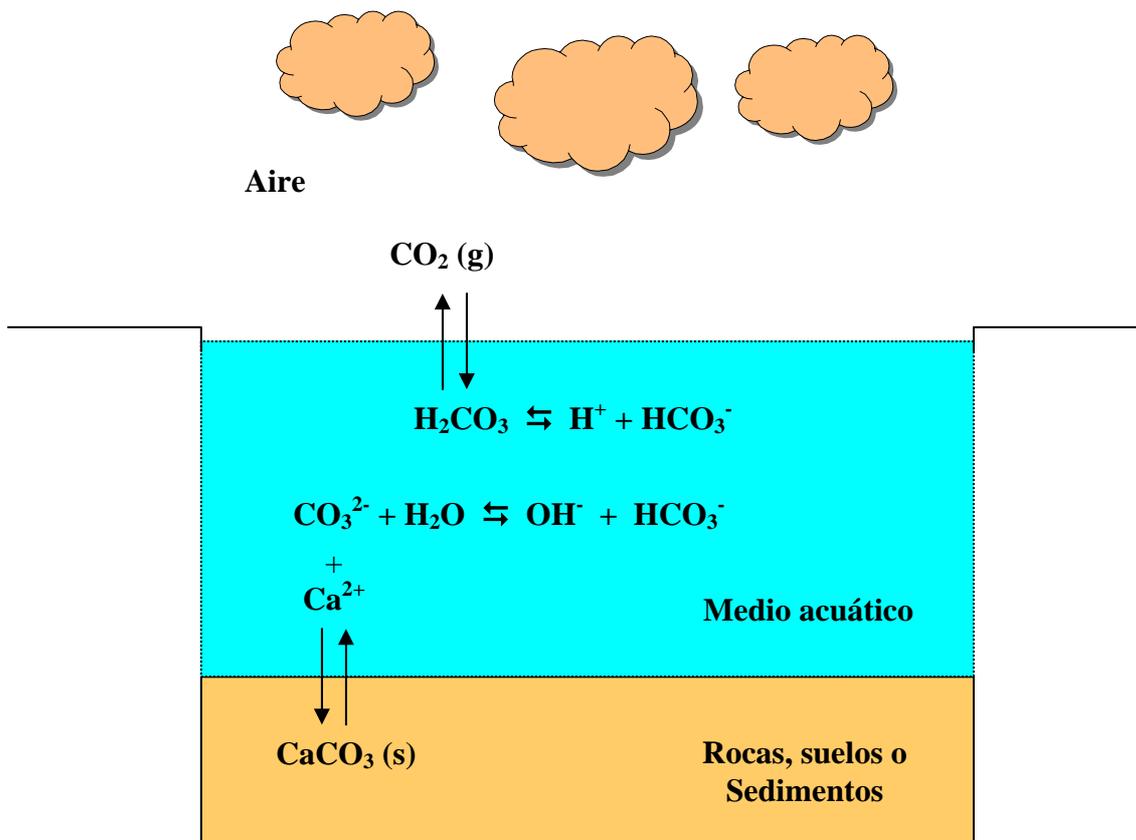


Si la totalidad del CO_2 presente en el agua es mayor que la cantidad de CO_2 en equilibrio, su exceso constituye dióxido de carbono agresivo.

Si $[\text{CO}_2]_{\text{libre}} > [\text{CO}_2]_{\text{equilibrio}} \Rightarrow$ Existe CO_2 agresivo por lo que el agua tenderá a disolver el $\text{CaCO}_3(\text{s})$ (tuberías de cemento, hormigones, etc.).

Si $[\text{CO}_2]_{\text{libre}} = [\text{CO}_2]_{\text{equilibrio}} \Rightarrow$ No hay CO_2 agresivo.

Si $[\text{CO}_2]_{\text{libre}} < [\text{CO}_2]_{\text{equilibrio}} \Rightarrow$ Hay un déficit de CO_2 en el equilibrio por lo cual el agua será incrustante y el CaCO_3 precipita.



Reacciones del sistema $\text{CO}_2/\text{CO}_3^{2-}$ en los tres medios

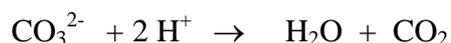
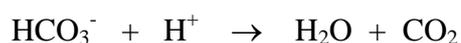
Acidez.- Su valor depende de la presencia de CO_2 libre, ácidos minerales y orgánicos y sales con cationes que sufran hidrólisis ácida, los cuales disminuyen el valor del pH y pueden provocar una anulación del efecto regulador de los pares amortiguadores ($\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$). Se determina mediante una volumetría de neutralización haciendo uso de una base fuerte y se expresa en mg de CaCO_3/l (ppm de CaCO_3).

Las principales fuentes naturales que provocan un aumento de la acidez son el CO_2 atmosférico disuelto y los ácidos orgánicos procedentes de la descomposición de la

materia vegetal o animal. Los vertidos industriales pueden aportar grandes cantidades de ácido, así como las lluvias ácidas.

Los efectos sobre el medio ambiente son de forma general:

1. *Destrucción de la vida acuática.* A $\text{pH} < 4$ se destruyen todos los vertebrados, muchos invertebrados y microorganismos, así como la mayoría de las plantas superficiales. El mecanismo es el siguiente:



El exceso de CO_2 en el medio acuático retarda la tasa de difusión del CO_2 de la sangre al agua, acumulándose en el animal y disminuye el transporte de O_2 , disminuye el pH de la sangre y puede provocar la muerte.

En el caso del agua de mar, más de un tercio del CO_2 emitido a la atmósfera como resultado de la actividad humana se disuelve en los océanos en forma de H_2CO_3 aumentando la acidez de la misma. Según previsiones realizadas en base a estudios en los últimos años si no se reduce el nivel de emisiones actuales, para el año 2100 el pH del agua de los océanos puede bajar unos 0,4 puntos. Una bajada sistemática de la acidez supone un efecto negativo para algunos organismos marinos como el coral y los crustáceos que atrapan el CaCO_3 disuelto en el agua para formar sus caparazones. Asimismo, un menor pH tendría un efecto sobre el fitoplancton, los ecosistemas marinos en general, el ciclo del carbono oceánicos y sobre el clima de la Tierra.

2. *Corrosión.* Si el pH del agua es menor que 6 se produce grave corrosión en tuberías, buques y estructuras.
3. *Daños a cosechas.* El agua debe mantener el pH entre 4,5 y 9. Cuando el agua es ácida ($\text{pH} < 4,5$) aumenta la solubilidad de las sales de Fe, Al, Mg y otros metales que pueden resultar tóxicos para las plantas. Si el agua es básica ($\text{pH} > 9$) puede inmovilizar algunos oligoelementos.

Oxígeno disuelto.

El oxígeno es un elemento fundamental para el mantenimiento de la vida acuática, ya que mientras los peces necesitan que el agua tenga niveles elevados de oxígeno disuelto, las bacterias necesitan niveles más reducidos. La cantidad de oxígeno disuelto es un indicador de la calidad del agua y se mide en mg de O_2/l . Se puede decir que el agua esta poco contaminada cuando la concentración de oxígeno es superior al 50% del

valor de saturación en esas condiciones de presión y temperatura. Se requieren del orden de 2 mg de O₂/l disueltos en agua para permitir la vida acuática. Un exceso de oxígeno disuelto en el agua de calderas favorece los procesos de oxidación.

El oxígeno en el agua tiene sus fuentes en la disolución del oxígeno atmosférico, la fotosíntesis y la recreación por agitación. Los procesos de desoxigenación de un agua son debidos a la oxidación biológica y a la respiración de los seres vivos que viven en su seno.

Los procesos de oxidación pueden afectar a compuestos inorgánicos como pueden ser nitritos, cloruros, sulfuros, Fe(II), etc., y en gran medida a los compuestos orgánicos, los cuales según sean susceptibles ó no de sufrir oxidación por los microorganismos presentes en el agua podemos clasificarlos en:

- *Materia Orgánica Biodegradable.*
- *Materia Orgánica no Biodegradable.*

En general reciben el nombre de “*residuos con requerimiento de oxígeno*” a todos aquellos compuestos que sufren un proceso de oxidación biológica consumiendo oxígeno y degradándose a otras sustancias.

El proceso de biodegradación depende de la naturaleza de las sustancias orgánicas. Así los factores que favorecen la biodegradabilidad son:

- Bajo peso molecular.
- Cadena poco ramificada.
- Pocos anillos o unidades aromáticas.
- Presencia de funciones alcohol, éter, amino, carbonil y carboxil.

A su vez los procesos de biodegradación están condicionados por los siguientes factores:

- Existencia y naturaleza de los organismos presentes.
- Temperatura del agua.
- Concentración de nutrientes (N y P) y oligoelementos (Ca, Mg, Fe,).
- Valores de pH que permitan la existencia de microorganismos.
- Presencia de agentes inhibidores y/o tóxicos.

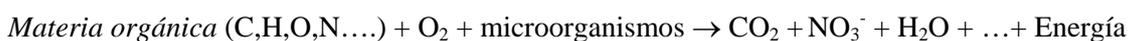
Los procesos de biodegradación son de tipo bioquímico que tienen lugar mediante enzimas segregadas por los microorganismos presentes en el agua (bacterias de carácter aerobio o anaerobio). Estas enzimas son catalizadores biológicos que se transforman y regeneran en el transcurso del proceso y que además se caracterizan por su especificidad.

Dependiendo de cómo tenga lugar el proceso, la degradación biológica da lugar a diferentes productos. Así, por ejemplo, la degradación biológica de la celulosa sería:



En los **procesos aerobios** las reacciones que tienen lugar son:

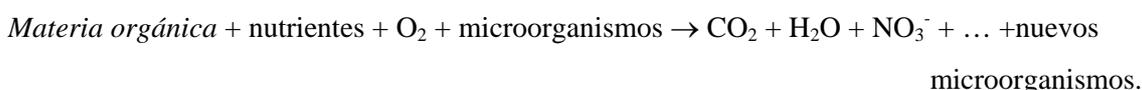
Reacciones energéticas:



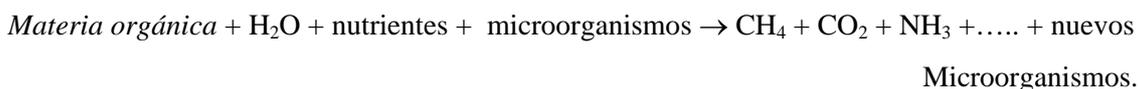
Reacciones de síntesis:



El balance global vendría dado por la siguiente ecuación:



En los **procesos anaerobios** el balance global sería:



Elemento del Compuesto Orgánico	Descomposición aerobia	Descomposición anaerobia
Carbono (C)	CO ₂	CH ₄
Hidrógeno (H)	H ₂ O	H ₂ O y CH ₄
Oxígeno (O)	H ₂ O	H ₂ O
Azufre (S)	SO ₄ ²⁻	H ₂ S
Nitrógeno (N)	NO ₃ ⁻	NH ₃

Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días (DBO₅).

Es un parámetro que nos proporciona información acerca de la concentración de materia orgánica biodegradable. Se obtiene midiendo la disminución de la concentración de oxígeno disuelto en el agua después de incubar una muestra durante 5 días a 20°C, en condiciones de oscuridad para evitar la formación de oxígeno por las algas, a una dilución adecuada, y manteniendo el valor del pH entre 7-7,5. Las unidades de medida son mg de O₂/l (ppm de O₂). Unos valores elevados de DBO₅ indican que la concentración de materia orgánica biodegradable es alta.

En el caso de aguas industriales se debe proceder a realizar un sembrado de microorganismos. En las condiciones de reacción indicadas, en el plazo de 5 días se degrada un 60-70% de la materia orgánica carbonada. Como referencia se dan los siguientes datos:

- Aguas muy puras: **DBO₅ < 3 ppm O₂**

- Aguas de pureza intermedia: DBO_5 3-5 ppm O_2
- Aguas contaminadas: $\text{DBO}_5 > 8$ ppm O_2

Los inconvenientes que presenta este método podemos resumirlas en:

- Larga duración del proceso analítico.
- El valor de DBO varía ante la presencia de sustancias tóxicas para los microorganismos como pueden ser los metales (Pb, Hg, Cu, Cr^{6+} ,...), detergentes, etc.
- No es afectado por la presencia de sustancias poco biodegradable: aceites.
- Es difícil de aplicar a aguas residuales industriales.

Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Representa la cantidad de materia susceptible de oxidación química contenida en el agua. Se diferencia de la DBO_5 en que los microorganismos oxidantes son reemplazados por un agente químico oxidante como el $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (DQO-Cr) ó el KMnO_4 (DQO-Mn) en medio ácido. Es un proceso rápido y proporciona una idea cuantitativa de la cantidad de materia orgánica o inorgánica susceptible de oxidación que se encuentra presente en el agua. Se expresa en mg de O_2/l y representa la cantidad de oxígeno equivalente al oxidante químico empleado en la determinación. Aun cuando se utiliza como indicador de materia química orgánica global, en el caso de aguas que contengan sustancias inorgánicas oxidables (sulfuros, Fe(II), Mn(II), nitritos, etc.) habrá que restar a la DQO total la cantidad de estas especies determinada por otros métodos.

$$\text{DQO} - \text{DBO} = \text{materia orgánica no biodegradable}$$

La relación entre la DBO_5 y la DQO nos proporciona información sobre la naturaleza de los contaminantes orgánicos existentes en el agua, así:

$\text{DBO}_5/\text{DQO} < 0,2 \Rightarrow$ Predominio de contaminantes orgánicos no biodegradables.

$\text{DBO}_5/\text{DQO} > 0,6 \Rightarrow$ Predominio de contaminantes orgánicos biodegradables.

La DQO de las aguas superficiales destinada al consumo humano debe ser menor de 30 mg de O_2/l . En las aguas potables, el límite de tolerable de DQO es de 5 ppm de O_2 .

En aguas potables y naturales para medir estos parámetros se utiliza el KMnO_4 (DQO-Mn) y en las aguas residuales se utiliza el dicromato potásico (DQO-Cr).

La correspondiente semirreacción de reducción para el $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ cuando oxida a la materia orgánica es: $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14 \text{H}^+ + 6 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{Cr}^{3+} + 7 \text{H}_2\text{O}$.

La semirreacción en el caso del oxígeno es: $\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$. Por ello podemos decir que el número de moles que una muestra necesita para llevar a cabo la

oxidación vendrá dado por la relación $6/4 = 1,5$ moles de $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, que es la relación de electrones puesta en juego según quién sea el oxidante.

Ejemplo.- *Se quiere determinar la DQO de un agua de río, para lo cual se procede a tomar una muestra de 25 ml que se valoró con una disolución 0,001M de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ necesitándose 8,3 ml para llegar al punto final. ¿Cuál sería la DQO de la muestra expresada en mg de O_2 /litro?*

Solución: Primero procedemos a calcular el número de moles del oxidante que se han utilizado:

$$\text{Moles de } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \text{ consumidos} = 0,001 \text{ moles/litro} \times 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ litros} = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ moles}$$

La cantidad equivalente de moles de O_2 que se requerirían para la oxidación es:

$$8,3 \cdot 10^{-6} \text{ moles} \times 1,5 \text{ moles de } \text{O}_2 = 1,245 \cdot 10^{-5} \text{ moles de } \text{O}_2$$

$$1,245 \cdot 10^{-5} \text{ moles de } \text{O}_2 \times 32 \text{ gr/1 mol} = 3,98 \cdot 10^{-4} \text{ gr de } \text{O}_2$$

La concentración correspondiente sería:

$$3,98 \cdot 10^{-4} \text{ g de } \text{O}_2 / 0,025 \text{ litros} = 0,0159 \text{ g de } \text{O}_2/\text{l} = 15,9 \text{ mg de } \text{O}_2/\text{litro}.$$

Otros parámetros que se utilizan para medir la cantidad de materia orgánica son: *Carbono Orgánico Total (COT)*. Mide la cantidad de CO_2 producido por la calcinación de una micromuestra; se expresa en mg C/l. Se detecta por medio de la absorción en Infrarrojo de este compuesto. Tiene la ventaja de que esta sometido a menos interferencia que la medida de DQO, más concretamente en presencia de muestras nitrogenadas.

Sustancias Extraíbles en Cloroformo (SEC). Mide la cantidad de ciertas sustancias orgánicas que pueden estar en disolución o pseudodisolución en agua. Permite extraer insecticidas clorados, compuestos fenólicos, etc., pero no compuestos orgánicos como taninos, materias proteicas y ciertos detergentes sintéticos. De hecho no se recupera más del 50-90% de estos productos. Un agua con un extracto clorofórmico mayor de 0,2 mg/l es indicativo de mala calidad. Las aguas naturales no contienen más de 0,05 mg/l.

Otros elemento inorgánicos a considerar son el **Nitrógeno** y el **Fósforo**. El nitrógeno es un elemento fundamental para que se lleven a cabo las reacciones biológicas. En el medio acuoso el nitrógeno puede estar presente en forma de nitrógeno orgánico, NH_3 , NO_3^- , NO_2^- . Un agua con un elevado porcentaje de nitrógeno orgánico o en forma de amoníaco es indicativa de una reciente contaminación del agua, mientras que por el contrario, un agua sin los componentes indicados y con una cantidad moderada de nitratos puede considerarse adecuada.

En lo que respecta al fósforo, su presencia en el agua suele ser en forma de fosfato procedente de fertilizantes y detergentes. Su presencia no supone riesgo para los organismos vivos, aunque afecta a la calidad del agua ya que favorece la eutrofización.

5.2.- Características microbiológicas.

Los principales microorganismos que se pueden encontrar en el agua son: bacterias, virus, y distintos tipos de algas (algas cianofíceas, *verdin de agua*). Los desechos humanos y animales (heces, orina y sangre) son portadores de agentes patógenos (bacterias y virus) que dan lugar a contaminación bacteriológica que puede provocar algunas enfermedades (hepatitis infecciosa, cólera, disentería, fiebres tifoideas,...).

Como patrón para determinar este tipo de contaminación se suele emplear algunos organismos indicadores como son las *bacterias coliformes*, que viven en el intestino grueso, no son patógenas y su presencia nos permite diagnosticar el tiempo transcurrido desde una contaminación fecal.

Otros organismos que se suelen emplear son los estreptococos fecales, que están ausentes en aguas no contaminadas y los *clostridium sulfitorreductores*. Estas bacterias no tienen importancia desde el punto de vista sanitario, ya que no son patógenas. Para algunos agentes patógenos que pueden contaminar las aguas como son las *Salmonellas*, *estafilococos* y *enterovirus*, se requieren análisis específicos.

Finalmente, hay que tener en cuenta que las algas presentes pueden ser causantes de diversos olores y sabores de las aguas, fundamentalmente en estado de putrefacción o en épocas de sequía.

5.3.- Depuración de las aguas.

Se puede decir que la principal fuente de contaminación antropogénica que afecta a las aguas naturales es la ocasionada por los vertidos de aguas residuales, de ahí la importancia de controlar esta fuente de contaminación mediante el tratamiento o depuración de las mismas antes de ser liberadas en el medio ambiente.

Se entiende por aguas residuales aquellas aguas que han sido alteradas en su composición inicial como consecuencia de su utilización en diferentes procesos provocando una pérdida de calidad. Estas aguas residuales son capaces de producir una alteración de las características del medio natural por lo cual representan un peligro para

el medio ambiente y los seres vivos. Según su procedencia podemos agrupar las aguas residuales en tres grandes grupos:

- Aguas residuales urbanas.
- Aguas residuales industriales.
- Aguas residuales agropecuarias.

La razón fundamental de tratamiento de este tipo de aguas es prevenir la contaminación y el proceso de eutrofización. Para conseguirlo se somete el agua a una serie de procesos.

El primer paso consiste en un proceso de aireación con el fin de evitar los malos olores purgando el agua con gases y compuestos orgánicos volátiles disueltos. Este proceso también provoca la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} que precipita en forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. En un segundo paso se adiciona $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y cal para regular el pH. Este proceso tiene por fin provocar la formación de un precipitado voluminoso de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$ que atrapa las partículas sólidas suspendidas en el agua. Una vez eliminado este precipitado se procede a la clarificación del agua. Con el fin de eliminar los compuestos orgánicos disueltos se hace pasar el agua a través del carbón activo. Finalmente se procede a la desinfección del agua mediante el empleo de cloro (Cl_2) dióxido de cloro y ozono con el fin de eliminar los microorganismos.

En el caso de las aguas residuales se hace uso de un sistemas de filtrados y sedimentados para disminuir los sólidos, proceso que recibe el nombre de “*tratamiento primario*”. El siguiente proceso tiene como finalidad la degradación bacteriana de los compuestos orgánicos a CO_2 para conseguir una disminución de la DBO, ya que de lo contrario el agua residual podría tener valores de la DBO tan altos que sobrepasan la capacidad oxidativa de las aguas receptoras provocando anoxia. Este es el llamado “*tratamiento secundario*”, cuya finalidad es una reducción del DBO del 90%.

Ahora bien, aunque el tratamiento secundario consigue una reducción del DBO, el problema que se plantea es que los iones NO_3^- , PO_4^{3-} y NH_4^+ no son afectados por estos procesos y entonces estos iones solubles serían vertidos conjuntamente con las aguas residuales provocando, debido a su carácter nutriente, la eutrofización de las aguas receptoras. Para ello se hacen necesarios una serie de procesos químicos que constituyen el “*tratamiento terciario*”. Así, el fosfato se elimina por precipitación con cal, originando la hidroxiapatita $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ que es insoluble.

Si aumentamos el pH añadiendo cal, el NH_4^+ pasa a NH_3 que es volátil y para eliminar la cal se disminuye el pH con CO_2 . Los posibles compuestos orgánicos que

puedan estar aún presentes se filtran con carbón activo y si queremos un agua muy pura se aplica un proceso de desinfección. Como proceso alternativo para eliminar el NH_4^+ debido a su elevado coste energético, se pueden emplear bacterias nitrificantes para transformar el NH_4^+ en NO_3^- y posteriormente, mediante bacterias desnitrificantes por medio de las cuales el NO_3^- pasa a N_2 . El uso de bacterias requiere un control riguroso de los cultivos. Como alternativa más ecológica se puede hacer pasar el efluente del tratamiento secundario a través de un humedal donde se realiza la filtración de NO_3^- y PO_4^{3-} .

5.4.- Criterios de Calidad.

Para estudiar la calidad global de las aguas se utilizan tanto métodos basados en parámetros físico-químicos como métodos de características biológicas. La diferencia entre unos y otros estriba en que los métodos físico-químicos nos informan de la naturaleza y características de las especies químicas presentes en el agua y de sus propiedades físicas mientras que los métodos biológicos nos dan información de su influencia en la vida acuática pero sin hacer referencia al contaminante o contaminantes presentes.

Indicadores físico-químicos de calidad de aguas.

Hay que tener en cuenta que la calidad de un agua no es un concepto absoluto y depende del tipo de uso a que va destinada. Entre los indicadores físico-químicos tenemos el “Índice de Calidad General (ICG)” que en caso de nuestro país hace uso de 23 parámetros, 9 básicos y 14 complementarios. A cada uno de estos parámetros (λ_i) se le asignan unas funciones o factores de ponderación (F_1 y F_2) que permiten calcular el valor del IGQ por medio de la siguiente expresión matemática.

$$\text{ICG} = \sum_{i=1,n} F_1(\lambda_i) F_2(\lambda_i n_i) = \sum_{i=1,n} Q_i \cdot P_i$$

Donde: Q_i = nivel de calidad, varía de 0 a 100.

P_i = coeficiente de producción ($\sum P_i = 1$).

Donde:

$$P_i = \frac{1/a_j}{\sum 1/a_j}$$

Donde los coeficientes **a** varían de 1 a 4.

Los nueve parámetros básicos para aguas superficiales son:

1.- Coliformes totales (a = 1)

6.- Materia en suspensión (a = 1).

2.- Conductividad (a = 1).

7.- Nitratos (a = 3).

3.- DBO₅ (a = 1).

8.- Oxígeno disuelto (a = 1).

4.- DQO-Mn (a = 3).

9.- Valor de pH (a = 1).

5.- Fosfatos totales (a = 3).

El IGQ puede variar entre 0 y 100 y los niveles de calidad se clasifican de acuerdo con los siguientes valores:

Valor de ICG	Grado de Calidad
100	Excelente
100-85	Muy buena
85-75	Buena
75-60	Utilizable
60-50	Mala
< 50	Pésima

Otros índices empleados son el llamado “*Índice simplificado de Calidad del Agua*” (ISQA) que utiliza los siguientes parámetros:

A.- DQO-Mn (Mide la materia orgánica total).

B.- Materia en suspensión (Mide las especies insolubles).

C.- Oxígeno disuelto en el agua (Mide de forma indirecta la materia orgánica biodegradable).

D.- Conductividad eléctrica (Mide las sales disueltas).

T.- Temperatura.

Estos parámetros se relacionan a través de una expresión matemática:

$$ISQA = T(A+B+C+D)$$

Una variante que tiende a emplearse es el “*Índice Automático de Calidad de Aguas (IAQA)*”, el cual se basa en el anterior ISQA y utiliza la temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, turbidez (en lugar de materia en suspensión), y el carbono orgánico total (COT) (en lugar de la DQO).

Indicadores biológicos de calidad de aguas.

Se basan en el estudio de la influencia de la contaminación con la composición y estructura de las comunidades biológicas que viven en las aguas (biocenosis) y los cambios que se producen. Este tipo de índices se dividen en tres grandes grupos:

1. *Índices bióticos*. Se basan en el estudio de comunidades acuáticas de determinadas especies y en especial de los macroinvertebrados bénticos.
2. *Índice de Saprobios*. Se basa en el estudio de los organismos saprobios o saprobióticos (bacterias, cianofíceas, diatomeas, hongos y protozoos) que viven y se desarrollan en zonas de descomposición de la materia orgánica.
3. Otros índices son:
 - *Índice de diversidad*. Relaciona calidad de agua con diversidad de comunidades que albergan. A mayor diversidad mayor calidad de aguas.
 - *Índice de relación*. Relaciona la calidad de las aguas con la proporción de organismos productores, consumidores y descomponedores en el ecosistema.
 - *Índice de Gabriel*. Es el cociente entre 2 veces el número de productores y la suma de consumidores y descomponedores.

5.5.- Prevención de la Contaminación del Agua.

Se puede decir que la principal fuente de contaminación de las aguas es la agricultura debido fundamentalmente a la escorrentía de las aguas superficiales y la filtración a los acuíferos de los fertilizantes y los plaguicidas empleados en el tratamiento de los cultivos.

Una forma de reducir este tipo de contaminación empleando cantidades adecuadas de los mismos y evitando su uso en las tierras situadas en cuesta. Se puede emplear fertilizantes de baja liberación y utilizar cultivos rotatorios como puede ser alternar siembras con plantas de escarda y con semillas de soja con otras plantas fijadoras de nitrógeno al objeto de reducir la necesidad de fertilizantes.

Aplicar los plaguicidas solo cuando sea absolutamente necesario y utilizando como método alternativo el control integrado de plagas. Las zonas de ganadería deberán controlar las escorrentías e infiltración del estiércol de corrales y cuadras plantando amortiguadores vegetales y estableciendo los corrales alejados de las aguas superficiales y utilizando estanques de retención con pozos bien diseñados con el fin de que esta agua rica en nutrientes pueda ser bombeada y aplicada como fertilizante orgánico en las tierras de labor o en zonas boscosas prácticas.

La reforestación de las cuencas críticas además de reducir la erosión del suelo y la gravedad de las inundaciones permite minimizar la contaminación por medio de la

sedimentación, asimismo contribuiría a ralentizar el calentamiento del planeta y la pérdida de hábitat de la flora y la fauna.

Las aguas de alcantarillado y las aguas residuales procedentes de la industria deben ser sometidas a procesos de tratamiento o depuración. Este tratamiento tiene como resultado unos lodos potencialmente tóxicos que deben ser tratados para su utilización como fertilizantes. Para ello hay que proceder a un tratamiento adecuado con el fin de eliminar bacterias patógenas, así como metales tóxicos y compuestos orgánicos que pueden finalmente acabar en productos alimenticios o bien filtrándose a las aguas subterráneas.

En el caso de las aguas costeras se pueden hacer las siguientes recomendaciones:

- Fomentar o exigir el empleo de zonas de separación de las aguas residuales y de la escorrentía de lluvia en las zonas urbanas costeras.
- Sistemas que permitan una protección de las zonas costeras sensibles y valiosas ecológicamente del desarrollo, prospección y transporte de petróleo.
- Exigencia de doble casco para los buques petroleros.
- Procesos de reciclaje del petróleo utilizado.
- Controlar los procesos de contaminación genética evitando la transferencia de especies no autóctonas en las aguas de lastre.

En lo que se refiere a las aguas subterráneas las recomendaciones son:

- Controles preventivos en los acuíferos próximos a vertederos y depósitos subterráneos.
- Sistema de detección de fugas en depósitos de materiales peligrosos.
- Prohibir la eliminación de residuos peligrosos en pozos profundos de inyección y en vertederos.
- Almacenamiento de cualquier tipo de material peligroso sobre la tierra en depósitos con sistemas eficaces que permitan detectar y controlar cualquier filtración.

Bibliografía.

- Contreras López, Alfonso y Molero Meneses, Mariana. *Introducción al estudio de la contaminación y su control*. U.N.E.D.
- Orozco Barrenetxea, Carmen et al. *Contaminación Ambiental: Una visión desde la Química*. Ed. Thompson.

- Spiro, T.G., y Stigliani, W.M. *Química Medioambiental*. Ed. Pearson-Prentice Hall.