



Capítulo 2. Procesos biológicos

En este capítulo se describen los procesos básicos de remoción de contaminantes y se pretende reafirmar su importancia y su interdependencia en los procesos de tratamiento (físicos, químicos y biológicos). Por otro lado, y aunque no es nuestro objetivo estudiar las bacterias, se mencionan de una manera general y según su clasificación, los diferentes tipos que de ellas están presentes en los humedales artificiales, (tanto patógenas como aquellas que nos ayudan al tratamiento de las aguas residuales) y algunas de sus funciones básicas de acuerdo a su especialidad. La actuación de los vegetales superiores, se menciona como una necesidad de conocer cómo contribuyen al tratamiento activo y pasivo para la remoción de contaminantes, haciendo énfasis en las ventajas en su utilización.

2.1. Procesos básicos

El proceso general a través del humedal consiste en la entrada de aguas residuales procedentes de los vertidos urbanos, en su paso, estancia en el humedal artificial y en la salida de un efluente, cuyo caudal ha sido despojado de gran parte de los productos ajenos a la composición normal del agua que habían sido aportados durante su uso urbano.

Se observa que los aportes están comúnmente constituidos por las aguas residuales afluentes y por la entrada de luz y calor. Esto hace que se desarrollen plantas fotosintéticas y los microorganismos capaces de soportar la composición de las aguas residuales que se vierten.

2.1.1. Proceso de remoción físico

Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociados con material particulado. El agua superficial se mueve muy lentamente a través de los humedales, debido al flujo laminar característico, la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes, por lo que la baja velocidad de flujo facilita la sedimentación de los sólidos suspendidos.

Las esteras de plantas en los humedales pueden servir como trampas de sedimentos, pero su función primordial es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la resuspensión de material particulado.

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es proporcional a la velocidad de las partículas y a la longitud del humedal. Para propósitos prácticos, la sedimentación es usualmente considerada como un proceso irreversible, resultando en acumulación de sólidos y contaminantes asociados sobre la superficie del suelo del humedal. Sin embargo, la resuspensión puede reducir la eficiencia de remoción. Algo de resuspensión podría ocurrir durante periodos de velocidad de flujo alta en el humedal.

Más comúnmente la resuspensión es el resultado de la turbulencia causada por el viento, bioturbación (perturbación por animales y humanos) y desprendimiento de gas. El desprendimiento



de gas puede ser oxígeno, debido a la fotosíntesis, metano y dióxido de carbono, producido por los microorganismos en el sedimento durante la descomposición de la materia orgánica.

2.1.2. Proceso de remoción biológico

La remoción biológica es quizá el camino más importante para la remoción de contaminantes en los humedales. Los contaminantes, que son también formas de nutrientes esenciales para las plantas, como nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por las plantas del humedal. Sin embargo, muchas especies de plantas del humedal son capaces de captar, e incluso acumular significativamente metales tóxicos, como cadmio y plomo (difícilmente encontrados en una descarga de la DICyG). La velocidad de remoción de contaminantes por las plantas varía mucho, dependiendo de la velocidad de crecimiento de la planta y de la concentración del contaminante en su tejido. Las bacterias y otros microorganismos presentes en el suelo también proveen, captan y almacenan nutrientes a corto plazo.

En los humedales el material de la planta muerta conocido como detritus, se acumula en la superficie del suelo. Algunos de los nutrientes u otros elementos eliminados previamente del agua por captación de la planta son reciclados nuevamente dentro del agua y suelo por pérdidas del detritus de la planta debido a la lixiviación y descomposición. La lixiviación de contaminantes solubles en agua puede ocurrir rápidamente en la muerte de la planta o del tejido de la misma, mientras que una pérdida más gradual de contaminantes ocurre durante la descomposición del detritus por las bacterias y otros organismos.

En la mayoría de los humedales, hay una acumulación significativa del detritus, porque la velocidad de descomposición disminuye sustancialmente bajo condiciones anaerobias que prevalecen generalmente en el suelo del humedal.

La velocidad de descomposición de la materia orgánica es más baja que la velocidad de sedimentación de la misma en el suelo, dando lugar a la formación de turba en el humedal pasado largo tiempo. De esta manera, algunos de los contaminantes captados originalmente por las plantas se pueden atrapar y almacenar como turba. La turba se puede acumular en los humedales y de esta forma almacenar por largo tiempo los contaminantes. Sin embargo, la turba es también susceptible a la descomposición si el humedal se drena. Cuando sucede eso, los contaminantes incorporados en la turba se pueden liberar, reciclar ó limpiar con un chorro de agua.

Los microorganismos pueden proporcionar una cantidad medible de contaminante captado y almacenado en sus procesos metabólicos, que desempeñan el papel más significativo en la remoción de compuestos orgánicos, sobre todo las bacterias del suelo que utilizan el carbono (C) de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndola a gases de dióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄).

La eficiencia y la velocidad de degradación orgánica de C por los microorganismos es altamente variable para los diversos tipos de compuestos orgánicos. El metabolismo microbiano también produce la remoción de nitrógeno inorgánico, es decir, nitrato y amonio.

Bacterias especializadas (*pseudomonas* sp) transforman metabólicamente el nitrato en gas nitrógeno (N₂), un proceso conocido como desnitrificación. El N₂ se pierde posteriormente a la atmósfera.

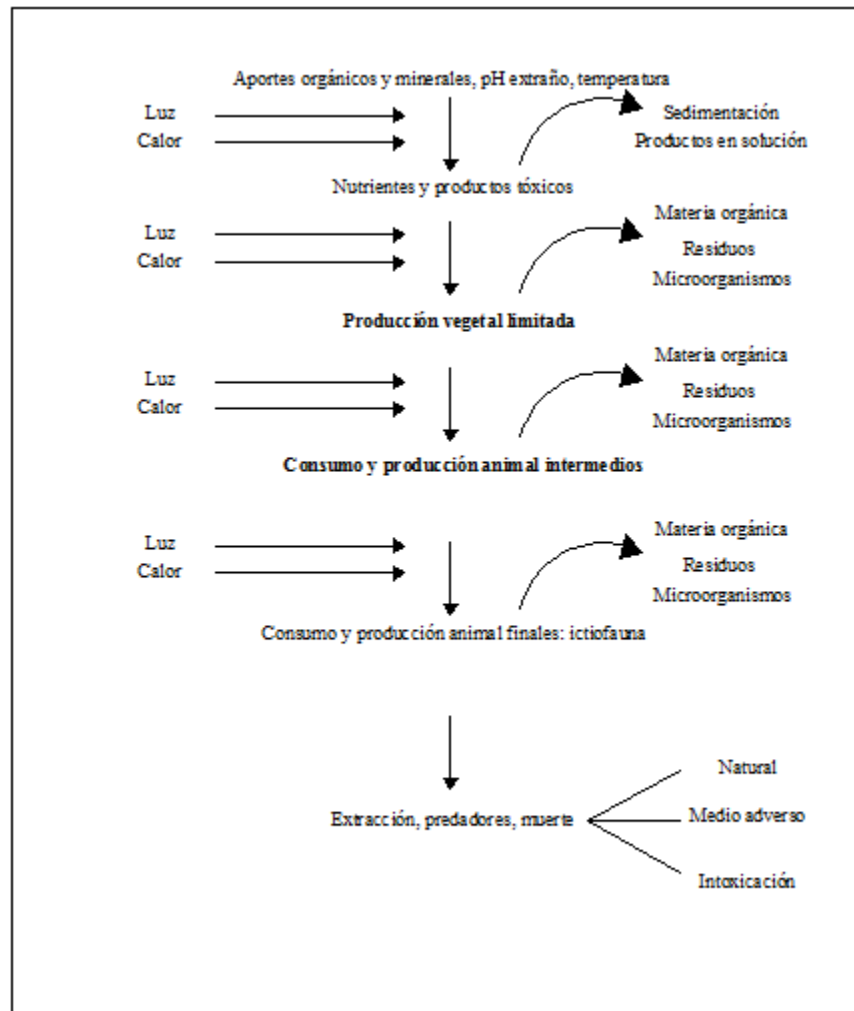


Figura 2.1. Procesos biológicos básicos en un humedal

2.1.3. Proceso de remoción química

El proceso químico más importante de remoción es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes.

La absorción es un término ampliamente definido para la transferencia de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de la solución (agua) a la fase sólida (suelo). La absorción describe realmente un grupo de procesos, que incluye reacciones de adsorción y de precipitación. La adsorción se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo, por intercambio catiónico. El intercambio catiónico implica la unión física de los cationes (iones positivamente cargados) a las superficies de las partículas de la arcilla y de la materia orgánica en el suelo. Esto es una unión mucho más débil que la unión química, por lo tanto, los cationes no se inmovilizan permanentemente en el suelo.

Muchos componentes de las aguas residuales y de escurrimiento existen como cationes, tal es el caso del amonio (NH_4^+).



La capacidad de los suelos para la retención de cationes, expresada como capacidad de intercambio catiónico, aumenta generalmente con el aumento de contenido de la arcilla y de la materia orgánica.

La absorción química representa una forma más fuerte y más permanente de vinculación que el intercambio catiónico. El fosfato también puede unirse con la arcilla y los óxidos de Fe y Al a través de la absorción química. El fosfato puede también precipitarse con los óxidos de hierro y aluminio para formar un nuevo mineral compuesto (fosfatos de Fe y Al), que son potencialmente muy estables en el suelo, produciendo el almacenamiento de fósforo a largo plazo. Otra reacción importante de precipitación que ocurre en los suelos del humedal es la formación de sulfuros de metales.

Tales compuestos son altamente insolubles y representan los medios eficaces para inmovilizar muchos metales tóxicos en humedales. La volatilización, que implica la difusión de un compuesto disuelto en el agua a la atmósfera, es otro mecanismo potencial de la remoción del contaminante en los humedales. La volatilización del amoníaco (NH_3) puede dar lugar a la remoción significativa de nitrógeno si el pH del agua es alto (mayor que 8.5). Sin embargo, un pH más bajo de 8.5, el nitrógeno del amoníaco existe casi exclusivamente en forma ionizada (amonio, NH_4^+), que no es volátil. Muchos tipos de compuestos orgánicos son volátiles y se pierden fácilmente a la atmósfera desde los humedales y de otras aguas superficiales. Aunque la volatilización puede remover con eficacia ciertos contaminantes del agua, puede demostrar ser indeseable en algunos casos, debido al potencial para contaminar el aire con los mismos contaminantes.

2.2. Origen de la biocenosis

Los organismos presentes en un humedal artificial pueden tener el siguiente origen:

- Por impartición directa: vegetales básicos, ictiofauna
- Por aporte de las aguas residuales afluentes
- Por presencia en el sustrato
- Por hibernación
- Por depósito
- Por llegada de adultos provenientes de otras zonas: aves, insectos
- Por aporte anemófilo
- Por aporte entomófilo
- Por aporte zoógamo en general
- Por aporte hidrogámico

Las especies presentes se pueden multiplicar de diversas formas, a saber:

- Existen especies de una generación anual: moluscos, tricoptera
- Existen especies de una generación plurianual: larvas grandes de coleópteros, odonata, etc.
- Existen especies de múltiples generaciones anuales: rotíferos, etc.

Los factores condicionantes básicos de esta multiplicación son la disponibilidad de nutrientes, la temperatura y la composición del medio.



2.3. Acción de las bacterias

Las bacterias presentes en las aguas residuales son la llave de la eficacia biológica en la unidad de tratamiento del humedal artificial. Las bacterias pueden convertir el material orgánico soluble presente en las aguas residuales, en nuevas células y elementos inorgánicos. Estos materiales alternadamente, proporcionan el alimento para otros organismos, por lo que se puede afirmar que su función básica es el consumo de materia orgánica y la degradación o la transformación de contaminantes en las aguas residuales que se aportan, esto gracias a la producción de enzimas que atacan o digieren los múltiples productos.

Las bacterias presentes, muy diversas, degradan tanto los productos orgánicos básicos como son las proteínas, lípidos, almidón o celulosa, como productos de descomposición. Las poblaciones bacterianas, si el medio es favorable, pueden crecer muy rápidamente y transformar así con gran aceleración fuertes cantidades de nutrientes y de otros productos.

Generalmente estos microorganismos son móviles o inmóviles de formas diversas, (cocos, bacilos, espirillos, filamentosas) de tamaño, modo de vida diferente según la especie y el medio, se multiplican por división celular y su velocidad de reproducción puede ser frenada por varias causas, como por ejemplo:

- Naturaleza de la bacteria
- Temperatura
- Disminución de alimentos y del oxígeno disuelto
- Acumulación de productos metabólicos tóxicos
- Variaciones de pH al aparecer ácidos, productos amoniacales, etc.
- Competencia vital

Según su nutrición se pueden clasificar en:

a) Bacterias parásitas

Son las que han tenido como huésped al hombre o los animales; suelen ser patógenas y producir enfermedades como tifus, cólera, disentería, etc.

b) Bacterias saprófitas

Son las que se nutren de los sólidos orgánicos residuales y provocan descomposiciones fundamentales en los procesos de depuración.

Según el medio, se pueden clasificar en:

a) Bacterias aerobias

Son aquellas que necesitan oxígeno procedente del agua para su alimento y respiración. El oxígeno disuelto que les sirve de sustento es el oxígeno libre (molecular) del agua, y las descomposiciones y degradaciones que provocan sobre la materia orgánica serán procesos aerobios; estos procesos se caracterizan por la ausencia de malos olores.



b) Bacterias anaerobias

Son las que consumen oxígeno procedente de los sólidos orgánicos e inorgánicos y la presencia de oxígeno disuelto no les permite subsistir. Los procesos que provocan se caracterizan por la presencia de malos olores.

c) Bacterias facultativas

Algunas bacterias aerobias y anaerobias pueden llegar a adaptarse al medio opuesto, es decir, las aerobias a un medio sin oxígeno disuelto y las anaerobias a aguas con oxígeno disuelto.

d) Bacterias autótrofas

Son aquellas que pueden sustentar su protoplasma a partir de sustancias minerales como anhídrido carbónico, sulfatos, fosfatos, carbonatos, etc.

Las bacterias pueden ser clasificadas de varias formas; sin embargo, lo más importante desde el punto de vista de la ingeniería es la acción operacional. Según R. Dinges, las bacterias más frecuentes en un humedal artificial, que son en gran parte las mismas que pueden aparecer en un humedal natural, son las que se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tipos de bacterias según su especialidad

Hidrolizan N orgánico a N amoniacal	Clostridium Proteus Micrococcus
Oxidán N amoniacal a nitritos	Nitrosomonas Nitrosolobu Nitrosospira Nitrosova Nocardia Streptomyces
Oxidán nitritos a nitratos	Nitrobacter Nitrococcus Nitrospina
Desnitrificación en medio anaerobio	Bacillus Pseudomonas
Reducen compuestos de S a sulfuros	Desulfovibrio Desulfotomaculum
Oxidán sulfuros a S elemental	Thiobacillus Thiobacterium Thiospira



Bacterias fotosintéticas que oxidan sulfuros a S	Chromatium Rhodomicrobium Rhodopseudomonas Rhodospirillum Thiocaspa Thiospirillum
Bacterias verdes oxidantes de sulfuros	Chlorobium Chloropseudomonas Clathrochloris Pelodictyon
Bacterias metanógenas	Methanobacterium Methanococcus Methanosarcina
Bacterias que metabolizan el metano	Methylococcus Methylomonas
Enterobacterias	Citrobacter Edwardsiella Enterobacter Escherichia Hafnia Klebsiella Proteus Salmonella Shigella

2.4. Acción de los vegetales superiores

El rasgo que mejor define a los vegetales es el hecho de que son seres vivos fotosintéticos (exceptuando plantas parásitas), por lo que su nutrición es de tipo autótrofo. La fotosíntesis les confiere la capacidad de utilizar como fuente de carbono un compuesto inorgánico, el dióxido de carbono, para desarrollarse y así generar materia orgánica; es lo que conforma la denominada producción primaria en el planeta. En el curso de la evolución, ha sucedido el desarrollo progresivo de los vegetales desde organismos muy elementales (algas unicelulares procarióticas) a organismos muy evolucionados (plantas superiores) que incorporan mecanismos sofisticados de adaptación al ambiente terrestre.

Unas veces complementan la actuación de las demás biocenosis del humedal artificial al consumir como nutrientes los productos transformados por los demás seres vivos presentes, otras veces transforman directamente en materia viva nutrientes aportados también directamente por el afluente.

Por otra parte, incorporan a sus ciclos metabólicos micronutrientes muy diversos, son capaces de captar metales pesados y otros productos más o menos tóxicos que suelen quedar bloqueados físicamente en las células, en los estomas o en los espacios intercelulares, con lo que al fin y al cabo consiguen depurar el líquido al extraerlos de él, aunque la gran labor de captación de algunos contaminantes la realiza el sustrato orgánico del humedal en un porcentaje muy superior al que puede alcanzar la acción de la vegetación.

A continuación se enlistan las contribuciones principales al tratamiento del agua residual y escorrentía por parte de las plantas emergentes de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato

- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen
- Toman el carbono, nutrientes, elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta
- Transfieren gases a la atmósfera
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos

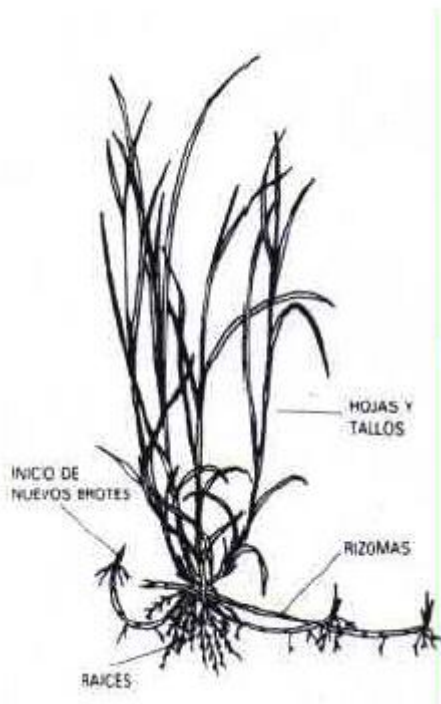


Figura 2.2. Esquema típico de una planta emergente

2.4.1. Actuación pasiva de la vegetación en la depuración

En el balance global de las funciones que desempeña la vegetación en los humedales artificiales, los procesos físicos suponen la función más importante de las plantas para la eficacia depuradora del sistema.

En primer lugar las macrófitas pueden ejercer funciones de desbaste, reteniendo los sólidos gruesos arrastrados por el agua residual. También actúan como barrera física para el flujo del agua residual, reducen la velocidad del afluente, lo que favorece la floculación y sedimentación de partículas en suspensión.

Además, las partes de las plantas que están en contacto con el afluente, actúan como soporte pasivo de microorganismos y crean en sus proximidades ambientes propicios para el desarrollo de estos; es decir, las plantas crean una enorme área superficial para el desarrollo de “bio-películas”, en las que crecen bacterias, protozoos y algas microscópicas.



También son de reseñar las actuaciones pasivas que se refieren a la parte aérea de las plantas. Cuando la vegetación tiene un determinado porte, como ocurre con plantas acuáticas emergentes, la vegetación tiene un cierto efecto amortiguador de las temperaturas extremas y otros fenómenos atmosféricos, ya que aísla la superficie del agua, intercepta lluvia y nieve, reduciendo las pérdidas de calor que eventualmente se producen por el viento.

2.4.2. Procesos activos de la vegetación en la depuración

Con respecto a las funciones que desempeñan activamente las plantas en los humedales artificiales, hay que destacar el intercambio gaseoso desde las hojas hacia la zona radicular en contacto con el agua residual y la extracción de contaminantes del agua. Las plantas adaptadas a vivir en aguas con elevada carga orgánica, utilizan su propia energía procedente de la energía solar captada por fotosíntesis enviando el oxígeno del aire hasta sus raíces a través de un sistema conductor muy especializado. Esto favorece la degradación de la materia orgánica del entorno de las raíces por medio de los microorganismos que viven asociados al sistema radicular de la planta.

También las macrófitas pueden ejercer una depuración directa por la absorción de iones contaminantes, tanto metales pesados como aniones eutrofizantes, nitratos y fosfatos principalmente.

Tabla 2.2. Funciones principales de las plantas en sistemas de tratamiento acuático

Raíces y/o tallos en la columna de agua	<ul style="list-style-type: none">• Superficie sobre la cual la bacteria crece• Medio de filtración y adsorción de sólidos
Tallos y/o hojas sobre la superficie de agua	<ul style="list-style-type: none">• Atenúan la luz del sol y así previenen el crecimiento de algas• Reducen los efectos del viento en el agua• Importante en la transferencia de gases para y desde las partes sumergidas de la planta

Tchobanoglous, G

La capacidad de transferencia de oxígeno por las plantas se estima entre 0-3 g O₂/m²/día, equivalente a 30 kg de DBO₅/ha/día, muy bajo para las cargas usuales del agua residual. Por otra parte la transferencia de oxígeno desde la atmósfera se estima entre 0-0.5 g de O₂/m²/día.

La muerte de las plantas puede volver a liberar estos elementos al agua, por lo que sería necesario un frecuente cosechado de plantas antes de que esto suceda.