

IV. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En la actualidad la clasificación que se puede dar a los procesos de depuración de agua residual es:

<i>Nivel de tratamiento</i>	<i>Descripción del proceso</i>
Preliminar	Remoción de materia flotante de gran tamaño.
Primario	Remoción de una porción de sólidos suspendidos y materia orgánica.
Primario Avanzado	Remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica generalmente adicionando químicos o por filtración.
Secundario	Remoción de materia orgánica biodegradable y de sólidos suspendidos. Procesos de desinfección son típicamente incluidos en esta definición.
Secundario con remoción de nutrientes	Remoción de materia orgánica biodegradable, sólidos suspendidos y nutrientes (nitrógeno y fósforo).
Terciario	Remoción de sólidos suspendidos residuales (después del tratamiento secundario) usando filtración granular media y de micro mallas. La desinfección es un proceso típico que forma parte del tratamiento terciario. Remoción de nutrientes se llega a incluir en esta definición.
Avanzado	Remoción de material suspendido y disuelto que permanece después de un tratamiento normal biológico, cuando se requiere para diversas aplicaciones de reuso de agua

4.1 Procesos Biológicos

Los procesos biológicos son tratamientos basados en la actividad biológica de ciertos microorganismos para poder llevar a cabo la depuración del agua. El agua residual se define en dos clases: agua residual doméstica o municipal y agua residual industrial.

El objetivo del tratamiento biológico para aguas residuales domésticas es:

- Transformar u oxidar constituyentes biodegradables en partícula y disueltos, en otros productos como H₂O y CO₂, entre otros.
- Capturar e incorporar sólidos suspendidos y coloidales no sedimentables en un floculo biológico o bio-película.
- Transformar o remover nutrientes, como nitrógeno y fósforo.

- Remover trazas de constituyentes orgánicos y compuestos específicos.

En cambio el objetivo del tratamiento biológico en aguas residuales industriales es remover o reducir la concentración de de compuestos orgánicos e inorgánicos. Debido a que muchos constituyentes o compuestos que se encuentran en el agua residual industrial son tóxicos para los microorganismos, se requieren de ciertos tratamientos adicionales antes de que el agua industrial sea descargada a algún sistema de colección de agua municipal. Para uso de agua residual en la irrigación agrícola, el objetivo del tratamiento biológico es remover nutrientes, específicamente nitrógeno y fósforo, ya que estos dos compuestos son capaces de estimular el crecimiento de plantas acuáticas, mecanismo llamado eutrofización.

Existen términos importantes utilizados en la clasificación de los procesos biológicos de tratamiento de agua residual que dependen de algunas características propias de los procesos como lo son la función metabólica, el proceso de tratamiento y las funciones del tratamiento.

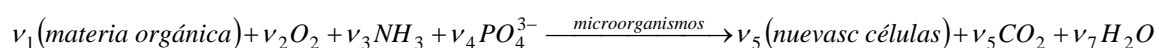
Tabla 2. Conceptos y términos empleados en los procesos biológicos

Procesos aerobios	Procesos de tratamiento biológico que ocurre en presencia de oxígeno.
Procesos anaerobios	Procesos de tratamiento biológico que ocurre en ausencia de oxígeno.
Procesos anóxicos	El proceso en el cual nitrógeno del nitrato es convertido biológicamente a nitrógeno gas en la ausencia de oxígeno. Este proceso también se conoce como denitrificación.
Procesos de crecimiento suspendido	Procesos biológicos donde los microorganismos responsables de la conversión de materia orgánica y otros compuestos en gas y materia celular están mantenidos en suspensión en el líquido.
Procesos de crecimiento fijo	Procesos biológicos donde los microorganismos responsables de la conversión de materia orgánica y otros compuestos en gas y materia celular están fijos a un medio inerte, como rocas o algunos empaques de cerámica y plástico. Este tipo de proceso también es conocido como procesos de película fija.
Remoción biológica de nutrientes	Termino aplicado a la remoción de

	nitrógeno y fósforo mediante procesos biológicos.
Remoción biológica de fósforo	Término que refiere a la remoción de fósforo mediante la acumulación de biomasa y la subsiguiente separación de sólidos.
Remoción de DBO carbonoso	Conversión de la materia carbonosa del agua residual a nuevo material celular y diferentes gases como productos finales.
Nitrificación	Procesos llevado a cabo en dos etapas, en la primera el amoniaco es convertido en nitritos y en la segunda etapa los nitritos se transforman en nitratos.
Substrato	Termino usado para denotar la materia orgánica

4.1.1 Microorganismos

La base del tratamiento biológico se basa en el funcionamiento de microorganismos. La remoción de DBO disuelto y en partícula, así como la estabilización de la materia orgánica es llevada a cabo biológicamente mediante el uso de una gran cantidad de microorganismos principalmente bacterias. El rol de los microorganismos en procesos aerobios es oxidar la materia orgánica carbonosa disuelta y en partícula, en productos simples y en nuevas células denominadas biomasa, como se representa en la siguiente ecuación.

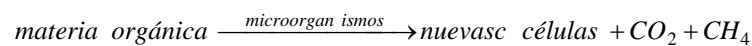


Donde v_n es el coeficiente estequiométrico. El oxígeno, el amoniaco y el fosfato representan la necesidad de nutrientes de los microorganismos para poder realizar la conversión de la materia orgánica a productos finales simples como lo son dióxido de carbono y agua. Como podemos observar en la flecha que indica la dirección de la reacción, el término indica el hecho de los microorganismos son necesarios para llevar a cabo el proceso de oxidación. El término que refiere a nuevas células se usa para representar la biomasa producida como resultado de la oxidación de la materia orgánica. Los microorganismos también son utilizados para la remoción de nitrógeno y fósforo en procesos de tratamiento de agua residual. Existen bacterias específicas capaces de oxidar amoniaco en nitritos y nitratos (proceso de nitrificación), mientras

que otras bacterias pueden reducir el nitrógeno oxidado a nitrógeno gas. Para la remoción de fósforo, los procesos biológicos se configuran para promover el crecimiento de bacterias con capacidad de remover y almacenar grandes cantidades de fósforo inorgánico.

La biomasa producida tiene una gravedad específica mayor al agua, por lo que se puede remover del efluente tratado mediante sedimentación gravitacional. Es importante señalar que si no existe una remoción periódica de la biomasa, el proceso de tratamiento no se ha completado, ya que la biomasa es orgánica y tiene un valor medido en DBO5 en el efluente.

Los microorganismos en los procesos biológicos anaerobios tiene como finalidad principalmente la conversión del material orgánico en productos como los son el dióxido de carbono y metano, como lo presenta la siguiente ecuación general.



4.1.2 Fuentes de energía y alimento de los microorganismos biológicos

Para realizar eficazmente sus funciones, los microorganismos requieren de fuentes de energía, fuentes de carbono para la síntesis de nuevas células y de elementos inorgánicos como nitrógeno, fósforo, azufre, calcio y magnesio como nutrientes. Nutrientes orgánicos también son necesarios para la síntesis celular. El carbono y las fuentes de energía generalmente se denominan como sustrato.

Fuentes de carbono.- Los microorganismos obtienen el carbono para el crecimiento celular a partir de la materia orgánica o de dióxido de carbono. Los microorganismos que usan carbón para la formación de nueva biomasa se denominan heterótrofos, mientras que los microorganismos que forman biomasa a partir de dióxido de carbono se llaman autótrofos. La conversión de dióxido de carbono a compuestos celulares con carbono requiere un proceso de reducción, el cual requiere energía para realizarse. Los organismos autótrofos utilizan una mayor cantidad de energía para la

síntesis que los organismos heterótrofos, por lo que generalmente existiendo una menor producción de células y tasas de crecimiento menores.

Fuentes de energía.- La energía que se necesita para la síntesis celular se puede proveer mediante luz solar o mediante una reacción de oxidación. Las bacterias son capaces de oxidar tanto compuestos orgánicos como inorgánicos para poder obtener energía. Los microorganismos capaces de usar la luz solar como fuente de energía se denominan fotótrofos, éstos pueden ser heterótrofos (ciertas bacterias reductoras de azufre) o autótrofos (algas o bacterias fotosintéticas). Los microorganismos que obtienen su energía a partir de reacciones químicas se conocen como quimiotrofos, éstos pueden ser heterótrofos (protozoarios, hongos y la mayoría bacterias) ó autótrofos (bacterias nitrificadoras). Los microorganismos químicamente autótrofos obtienen su energía de la oxidación de compuestos inorgánicos reducidos, como el amoníaco, nitritos, hierro y sulfuro, mientras que los microorganismos químicamente heterótrofos, usualmente obtiene su energía de la oxidación de compuestos orgánicos.

Las reacciones mediante las cuales los microorganismos quimiotrofos producen energía son de oxido-reducción, existiendo una transferencia de electrones de un donador a un receptor. La parte donadora es oxidada mientras que la receptora es reducida. Ambas partes pueden ser ya sea compuestos orgánicos o inorgánicos, dependiendo del microorganismo.

Cuando el oxígeno es usado como receptor de electrones la reacción se llama aeróbica mientras que las demás reacciones que involucran otros receptores se denominan anaerobias. El término anóxico se utiliza para distinguir el uso de nitritos y nitratos como receptores de electrones de otros en condiciones anaerobias. En condiciones anaerobias ocurre la reducción de nitritos y nitratos a nitrógeno gas, esta reacción también se conoce como desnitrificación biológica.

4.1.3 Requerimientos nutricionales y de crecimiento

Los nutrientes, las fuentes de carbón así como las fuentes de energía pueden ser el material limitante para el crecimiento y síntesis de células microbianas. Los principales nutrientes inorgánicos que necesitan los microorganismos son N, S, P, K,

Mg, Ca, Fe, Na y Cl. Algunos otros nutrientes de menor importancia incluyen al Zn, Mn, Mo, Se, Co, Cu y Ni. Los nutrientes orgánicos requeridos, mejor conocidos como factores de crecimiento, son compuestos que necesitan los organismos como precursores o como constituyentes orgánicos de material celular, los cuales no pueden ser sintetizados por otras fuentes de carbono. A pesar requerimientos de factores de crecimiento difieren de un organismo a otro, los principales factores de crecimiento caen en las siguientes 3 clases:

- Aminoácidos
- Bases nitrogenadas (purinas y pirimidinas)
- Vitaminas

Para el tratamiento de aguas residuales municipales generalmente están presentes cantidades suficientes de nutrientes en el agua a tratar, sin embargo para aguas de origen industrial, es necesario agregar nutrientes para poder llevar a cabo algún proceso biológico. La falta de cantidades necesarias de nitrógeno y fósforo es un caso frecuente especialmente en los procesos de tratamiento de agua residual proveniente de la industria alimenticia o de aguas residuales con altas cargas de materia orgánica. Usando la fórmula $C_{12}H_{87}O_{23}N_{12}P$ para la composición de la biomasa, cantidades de 12.2 g de nitrógeno y 2.3 g de fósforo son necesarias por cada 100 g de biomasa.

4.1.4 Tratamientos secundarios con remoción de nutrientes

Ya se mencionó la importancia de los nutrientes para el correcto funcionamiento de procesos biológicos, sin embargo el exceso de los mismos, primordialmente de nitrógeno y fósforo, puede ser causa de problemas de contaminación de cuerpos de agua, un claro ejemplo de ésta es el proceso denominado eutrofización.

Eutrofización es el proceso de enriquecimiento del agua por nutrientes, especialmente compuestos de nitrógeno y fósforo que aceleran el crecimiento excesivo de algas y otras plantas acuáticas, las cuales al morir se depositan en el fondo de los cuerpos de agua receptores, generando residuos orgánicos que, al descomponerse, consumen gran parte del oxígeno disuelto y de esta manera pueden afectar a la vida acuática y producir la muerte por asfixia de la fauna y flora.

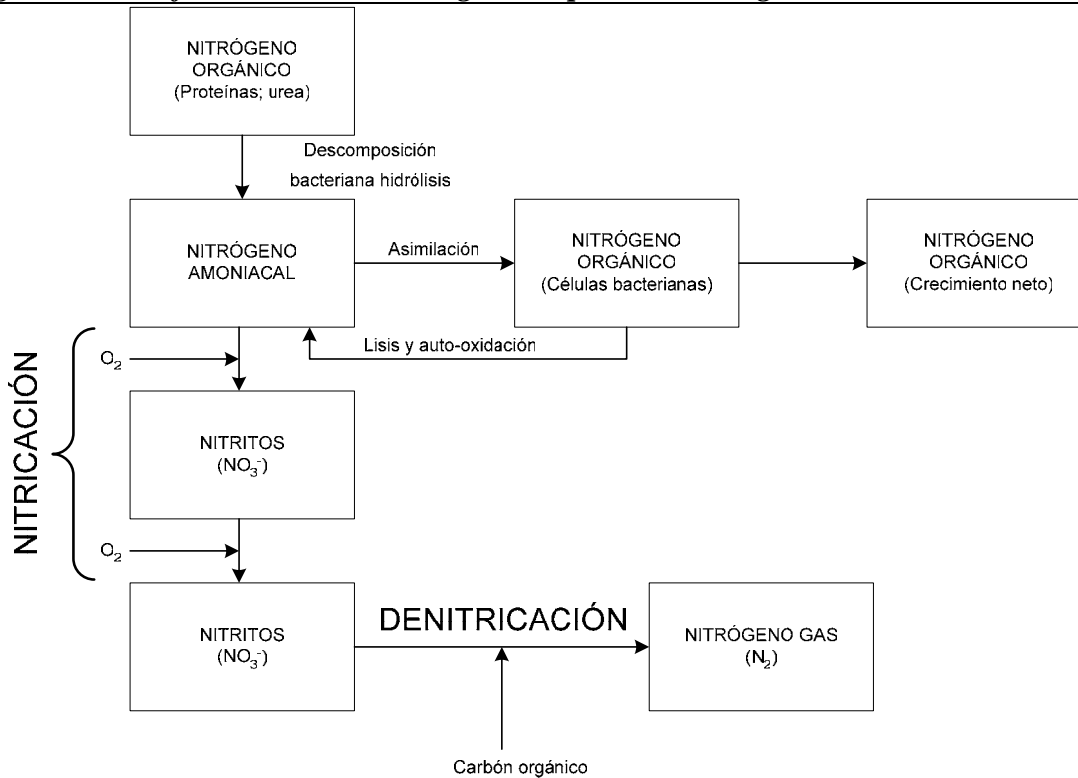
Una de las causas de este aporte nutricional se da de forma natural, como la erosión de la roca, la descomposición de la materia orgánica silvestre y otros procesos naturales producen normalmente, cantidades limitadas de estos nutrientes. Sin embargo la segunda y principal fuente de nutrientes provienen de las actividades humanas, un ejemplo son las aguas residuales domésticas, cuyo aporte de nitrógeno y fósforo, principalmente, proviene de las evacuaciones humanas y de los productos de limpieza. Con lo que respecta a las aguas industriales, diversas industrias producen también vertidos más o menos ricos en estas sustancias, como lo son algunas del ramo alimentario. Sin embargo para la totalidad de plantas de tratamiento biológicas para aguas residuales industriales es necesaria la adición de los nutrimentos, por lo que en la mayoría de los casos tienen presencia.

Dentro de la rama de procesos biológicos de tratamiento de agua residual los tres procesos más importantes para la eliminación de nutrientes son tres, de los cuales dos relacionados con el nitrógeno y uno para el fósforo, siendo los procesos de nitrificación, denitrificación y eliminación de fósforo respectivamente.

4.1.5 Eliminación de nitrógeno

La eliminación de este importante nutriente se da mediante dos procesos, la nitrificación y la denitrificación. Para entender de mejor manera estos procesos, es necesario entender las diferentes transformaciones del nitrógeno en procesos biológicos, los cuales se representan en la figura 1.

Figura 1. Transformaciones del nitrógeno en procesos biológicos



4.1.6 Nitrificación biológica

El término de nitrificación describe un proceso biológico en dos etapas en el cual el amoníaco ($\text{NH}_4\text{-N}$) es oxidado a nitrito ($\text{NH}_2\text{-N}$) y este a su vez es oxidado a nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$). La necesidad de la nitrificación en los procesos de tratamiento de agua residual surge de la calidad del agua con respecto a: el efecto del amoníaco al agua receptora con respecto la demanda de oxígeno y la toxicidad para la vida marina, la necesidad de realizar una remoción de nitrógeno para controlar la eutrofización y finalmente la necesidad de llevar a cabo un control de nitrógeno para el reuso de agua, incluyendo proceso de re-inyección.

Las bacterias aerobias autotróficas son responsables de la nitrificación en los procesos de lodos activados y de biopelícula. La nitrificación puede llevarse a cabo mediante procesos en suspensión y fijos, para los de crecimiento en suspensión es común se realice la nitrificación en la misma etapa o reactor donde se lleva a cabo la remoción

de DBO₅. En los casos donde existe un alto potencial de sustancias tóxicas o inhibitorias en el agua residual se puede utilizar un sistema de lodos de dos etapas. Como ya se mencionó anteriormente, la nitrificación es un proceso de dos etapas en la cuales participan dos grupos de bacterias. En la primera fase, el amoníaco es oxidado a nitritos mientras que en la segunda etapa los nitritos son oxidados a nitratos, ambas etapas son realizadas mediante la intervención de bacterias autótrofas distintas.

4.1.7 Denitrificación biológica

La reducción biológica de nitratos a óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gas se denomina denitrificación biológica. Existe un amplio rango de bacterias que han demostrado sus capacidades de denitrificación, tanto heterotróficas como autótrofas. Este proceso comprende la oxidación biológica de diversos sustratos orgánicos usando nitritos y nitratos como receptor de electrón en lugar del oxígeno como sucede en la oxidación de materia orgánica.

4.1.8 Eliminación de fósforo

La eliminación de este nutriente también se relaciona al control de la eutrofización, ya que el fósforo es el nutriente limitante en la mayoría de los sistemas de agua fresca. Anteriormente esta reducción de fósforo se realizaba mediante un proceso químico de adición de sales de aluminio o hierro, pero en la década de los 80's el éxito de plantas biológicas de remoción de fósforo alentó el uso de esta tecnología, la cual tiene ventajas en la reducción de costos asociados a los químicos y en la reducción de la producción de lodos en comparación con la precipitación química.

La finalidad del proceso es remover el fósforo proveniente del agua residual incorporándolo a la biomasa, la cual es removida del proceso como resultado del desecho de lodos. Los organismos acumuladores de fósforo (PAOs, siglas en inglés) se manipulan para crecer y consumir fósforo en sistemas donde la configuración permite a éstos una ventaja competitiva frente a otras bacterias.

4.1.9 Configuraciones para la remoción de nutrientes

Existen procesos biológicos específicos para llevar a cabo la eliminación de nutrientes, métodos de eliminación de materia orgánica junto con la eliminación de nitrógeno y tecnologías de remoción de fósforo por separado generalmente. Como se ha mencionado con anterioridad, actualmente la finalidad de la ingeniería de aguas residuales es además de la remoción de materia orgánica descrita como DBO₅ es la eliminación de los nutrientes. Por lo tanto se han buscado configuraciones que sean capaces de llevar a cabo los procesos de oxidación de materia orgánica, eliminación de nitrógeno y de fósforo de la manera más eficiente y a un menor costo por el tratamiento. A continuación se mencionan algunos de los procesos utilizados para llevar a cabo lo anterior.

Tabla 3. Procesos biológicos utilizados para la remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo

Reactor secuencial por lotes	Flujo tapón convencional
Lodos activados completamente mezclados CMAS	Estabilización por contacto
Oxidación en zanjas	Proceso Krauss
Proceso Orbal TM	Proceso Biolac TM
Proceso Phoredox (A/O)	Proceso A ² /O
Proceso UCT	Proceso VIP
Proceso Johannesburg	PhoStrip