

Oxidación Anaerobia del Amoniacó en el Tratamiento de las Aguas Residuales
Domésticas a Gran Escala Aplicado a la planta de Tratamiento de Agua Residual de la
Ciudad de Tunja

Yeimy Tatiana Osorio Churque

Marcos Duván Solano Martínez

Universidad de Boyacá

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Tunja

2021

Oxidación Anaerobia del Amoniacco en el Tratamiento de las Aguas Residuales
Domésticas a Gran Escala Aplicado a la planta de Tratamiento de Agua Residual de la
Ciudad de Tunja

Yeimy Tatiana Osorio Churque

Marcos Duván Solano Martínez

Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Ambientales

Asesor

Jaime Diaz Gómez

Ingeniero ambiental

Universidad de Boyacá

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Ingeniería Ambiental


Tunja

2021

Oxidación anaerobia del amoniaco

Nota de aceptación:

Los estudiantes Yeimy Tatiana Osorio Churque y Marcos Duván Solano Martínez, realizaron la alternativa de grado en la modalidad de trabajo de grado, con el proyecto titulado: “Oxidación Anaerobia del Amoniaco en el Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas a Gran Escala Aplicado a la planta de Tratamiento de Agua Residual de la Ciudad de Tunja”, obteniendo una nota de aprobación de cuatro punto cero (4.0) respectivamente.



Firma presidente del Jurado



Diego Camilo Guio Sandoval

Firma del jurado



Firma del jurado

Tunja, 4 de noviembre del 2021

Oxidación anaerobia del amoníaco

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”
(Universidad de Boyacá. Acuerdo 958 del 30 de marzo de 2017, Artículo décimo primero).

Oxidación anaerobia del amoniaco

Este proyecto de grado es un homenaje a nuestros padres por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales íntegros, dentro de una institución de educación superior, por permitirnos comenzar el camino hacia la materialización de los sueños y la búsqueda de nuestros más profundos anhelos, ya que su apoyo ha sido el pilar fundamental para lograr culminar satisfactoriamente uno de tantos escalones para lograr el éxito profesional y la integridad moral, igualmente este proyecto está dedicado a cada una de las personas que de una u otra manera aportaron con sus conocimientos a la formulación y desarrollo del presente proyecto.

Lo efímero del tiempo se desvanece cada vez que la vida se fundamenta en el conocimiento y la felicidad. De igual manera agradecemos a nuestros amigos y familiares quienes estuvieron junto a nosotros en este proceso de formación académica y profesional.

Agradecimientos

Va dirigido a nuestros padres, hermanos, amigos y demás familiares quienes nos han brindado su apoyo incondicional durante estos años, con el objetivo de formarnos como profesionales íntegros, útiles dentro del desarrollo social y profesional.

Agradecemos a nuestros asesores, el ingeniero Jaime Diaz Gómez Docente de la universidad de Boyacá y el MSc. Lic. Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio por brindarnos su experiencia y conocimiento para el desarrollo oportuno del proyecto.

Oxidación anaerobia del amoniaco

Contenido

Introducción	17
1. Diagnóstico de la aplicación del proceso anammox en el tratamiento de las aguas residuales a gran escala.....	18
1.1. Conceptualización y descripción del proceso de oxidación anaerobia del amoniaco en aguas residuales domésticas	18
Las bacterias Anammox.....	19
1.2. Caracterización del proceso anammox frente a procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales.	21
1.3. Aplicaciones del proceso Anammox dentro un sistema de tratamiento.....	21
2. Caracterización del agua residual doméstica de la planta de tratamiento de agua residual de Tunja-Boyacá.....	23
2.1 Descripción de la PTAR de la ciudad de Tunja	23
2.2. Caracterización del agua residual de la ciudad de Tunja	25
3. Formulación e implementación del modelo del proceso Anammox	26
3.1 Modelo del proceso de la oxidación anaerobia del amoniaco en aguas residuales domésticas mediante el simulador GPS-X.....	26
3.1.1. <i>Planteamiento del modelo en condiciones operativas reales</i>	29
3.1.1. <i>Planteamiento del modelo en condiciones operativas ideales</i>	29
3.2. Análisis de resultados de la modelación del proceso Anammox	30
3.2.1. Análisis de resultados basados en las condiciones operativas de Tunja.....	31
3.2.1.4. Tanque Anammox.....	34
3.2.1.5. Centrifuga	37

Oxidación anaerobia del amoníaco

3.2.1.6. Efluente	38
3.2.2 Análisis de resultados para un tiempo de retención de 9 horas.....	39
3.2.2.2 Tanque de aireación (nitrificación)	40
3.2.2.3 Tanque Anammox	42
3.2.2.4 Centrifuga.....	45
3.2.2.5 Lodos.....	46
3.2.2.6. Efluente	48
3.3. Eficiencia del proceso Anammox.....	49
3.3.1. Eficiencia del proceso anammox basados en los resultados del modelo de las condiciones operativas reales de Tunja.....	49
3.3.1.2 Eficiencia de remoción de la DQO	50
3.3.1.3. Eficiencia de remoción del amoníaco evaluada en el efluente.....	50
3.3.1.4 Eficiencia de remoción de DBO y DQO	51
3.3.2. Eficiencia del proceso anammox basados en los resultados del modelo con tiempo hidráulico de retención de 9 horas	52
3.3.2.1 Eficiencia de remoción del amoníaco en el tanque anammox	52
3.3.2.2 Eficiencia de remoción de la DBO y DQO.....	52
3.3.2.3. Eficiencia de remoción del amoníaco evaluada en el efluente.....	53
3.3.2.4 Eficiencia de remoción de la DBO y DQO	53
Conclusiones	56
Recomendaciones.....	58
Referencias.....	59
Anexos.....	63

Oxidación anaerobia del amoníaco

Lista de tablas

Tabla 1. Aplicación del proceso anammox en PTAR'S a gran escala.	22
Tabla 2 Medición de los parámetros medidos en campo de agua residual cruda de Tunja. 25	
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos del agua residual.....	25
Tabla 4. Caracterización del afluente	31
Tabla 5. Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del digester anaerobio	32
Tabla 6. Resultados obtenidos dentro del tanque de nitrificación	33
Tabla 7. Resultados de la simulación en el tanque anammox	35
Tabla 8.Resultado de las concentraciones obtenidas dentro de la centrifuga	37
Tabla 9. Resultados de las concentraciones obtenidas del efluente del sistema.....	38
Tabla 10. Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del digester anaerobio	39
Tabla 11. Resultados obtenidos dentro del tanque de nitrificación	41
Tabla 12. Resultados de la simulación en el tanque anammox	42
Tabla 13. Resultado de las concentraciones obtenidas dentro de la centrifuga.....	45
Tabla 14. Resultados obtenidos dentro de los lodos de exceso	46
Tabla 15. Resultados de las concentraciones obtenidas de la Biomasa.....	47
Tabla 16. Resultados de las concentraciones obtenidas del efluente del sistema.....	48

Lista de Figuras

Figura 1. Ciclo del nitrógeno	19
Figura 2. Microfotografía electrónica de Estructura celular.	20
Figura 3. Muestra de lodos granulares Anammox	20
Figura 4. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (VEOLIA) Tunja – Boyacá.....	23
Figura 5. Consejero del afluente	27
Figura 6. Esquema del proceso Anammox modelado mediante GPS-X	28
Figura 7. Afluente del sistema	31
Figura 8. Tanque Digestor Anaerobio.....	32
Figura 9. Tanque de Nitrificación	33
Figura 10. Tanque Anammox	34
Figura 11. Concentración de gas di nitrógeno soluble en el tanque Anammox.....	36
Figura 12. Concentración de bacterias anammo	36
Figura 13. Pantalla múltiple	37
Figura 14. Efluente del sistema.....	38
Figura 15. Concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente	39
Figura 16. Tanque Digestor Anaerobio.....	39
Figura 17. Tanque de Nitrificación	40
Figura 18. Concentración de nitrógeno amoniacal y nitritos en el tanque de Nitrificación. 42	
Figura 19. Tanque Anammox	42
Figura 20. Concentración de nitrógeno amoniacal en el tanque Anammox	44
Figura 21. Concentración de nitritos y nitratos en el tanque Anammox.....	44
Figura 22. Gas di nitrógeno soluble en el tanque anammox	45
Figura 23. Pantalla múltiple	45
Figura 24. Disposición de lodos.....	46
Figura 25. Concentración de biomasa Anammox	46
Figura 26. Efluente del sistema.....	48
Figura 27.Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anammox	50

Oxidación anaerobia del amoníaco

Figura 28. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anammox	51
Figura 29. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anammox	53
Figura 30. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el efluente.	54

Glosario

Agua residual: las aguas residuales corresponden a todas aquellas afectadas directamente por actividad antropogénica mediante residuos líquidos de origen doméstico o industrial. (READCIVIL, 2019).

Amonio: el amoníaco es un nutriente que contiene nitrógeno e hidrógeno. Su fórmula química es NH_3 en el estado no ionizado y NH_4^+ en forma ionizada. El amoníaco total es la suma de ambos NH_3 y NH_4^+ . El amoníaco total es lo que se mide analíticamente en agua (Kun & Kearney, 1974).

Bacteria: las bacterias son organismos procariotas unicelulares, que se encuentran en casi todas las partes de la Tierra. Son vitales para los ecosistemas del planeta. Algunas especies pueden vivir en condiciones realmente extremas de temperatura y presión (Natural Human Genoma research institute).

Desnitrificación: la desnitrificación es la reducción de nitratos o nitritos convirtiéndolos en óxidos de nitrógeno, amoníaco y nitrógeno libre mediante determinados microorganismos. (GRAF, 2018).

Eficiencia: del latín eficiencia, acción, fuerza, virtud de producir. Criterio económico que revela la capacidad administrativa de producir el máximo resultado con el mínimo de recurso, energía y tiempo, por lo que es la óptima utilización de los recursos disponibles para la obtención de resultados deseados (Rojas, Jamines & Valencia, 2017).

Efluentes: derivación de un curso de agua principal o de un lago. Agua residual u otro líquido, parcial o completamente tratado o en su estado natural que, fluye de un depósito, estanque, planta de tratamiento o planta industrial (aguamarket, 2019).

Eutrofización: la eutrofización se refiere a la concentración excesiva de nutrientes inorgánicos procedentes de actividades humanas, principalmente Nitrógeno (N) y Fósforo (P),

Oxidación anaerobia del amoníaco

en un cuerpo de agua superficial, produciendo una proliferación descontrolada de algas Fito planctónicas y provocando efectos adversos en las masas de agua afectadas y los procesos biológicos desarrollados (Zarza, 2019).

Lodos: el tratamiento del agua residual trae siempre como consecuencia la formación de lodos residuales, que son subproductos indeseables difíciles de tratar y que implican un costo extra en su manejo y disposición (García, 2006).

Metabolismo: conjunto de reacciones químicas que tiene lugar en la célula, y tiene 3 funciones específicas: obtener energía química del entorno, almacenarla, para utilizar luego en diferentes funciones celulares, convertir los nutrientes exógenos en unidades precursoras de los componentes macromoleculares de la célula bacteriana, por último, formar y degradar moléculas necesarias para funciones celulares específicas, como por ejemplo, movilidad y captación de nutrientes (Varela & Grotiuz, 2008).

Nitrificación: la nitrificación es el paso en el ciclo del nitrógeno que vincula la oxidación del amoníaco (producido por la degradación de la materia orgánica) con la pérdida de nitrógeno fijo en forma de gas dinitrógeno. Lo realizan algunos grupos diferentes de microorganismos, incluidas las bacterias oxidantes del amoníaco, las arqueas oxidantes del amoníaco y las bacterias oxidantes del nitrito. Estos microbios son todos aerobios y son predominantemente autótrofos. (The Indian Nitrogen Assessment, 2017).

Oxidación: la oxidación como tal se refiere al proceso químico que implica la pérdida de electrones por parte de una molécula, átomo o ion. Cuando esto ocurre, decimos que la sustancia ha aumentado su estado de oxidación

Proceso: un proceso es comprendido como todo desarrollo sistemático que conlleva una serie de pasos ordenados u organizados, que se efectúan o suceden de forma alternativa o simultánea, los cuales se encuentran estrechamente relacionados entre sí y cuyo propósito es llegar a un resultado preciso (Salzar, 2019).

Oxidación anaerobia del amoníaco

Temperatura: la temperatura está relacionada con la sensación que experimentamos al tocar ciertos objetos. Esta sensación nos permite clasificarlos en objetos fríos y objetos calientes, las unidades de medida de temperatura son los grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), los grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) y los grados Kelvin (K). El cero absoluto (0 K) corresponde a $-273,15^{\circ}\text{C}$.

Oxidación anaerobia del amoniac

Resumen

Osorio Churque, Yeimy Taiana & Solano Martínez, Marcos Duván

Oxidación anaerobia del amoniac en el tratamiento de las aguas residuales domésticas a gran escala aplicado a la planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Tunja / Yeimy Tatiana Osorio Churque, Marcos Duván Solano Martínez. - - Tunja : Universidad de Boyacá, Facultad de Ciencias e ingeniería, 2021.

79 p. : il. + 1 CD ROM. - - (Trabajo de Grado UB, Ingeniería Ambiental; n°)

Trabajo de Grado (Ingenieros Ambientales). - - Universidad de Boyacá, 2021.

El presente trabajo recopila información acerca del concepto de la oxidación anaerobia del amoniac (anammox) dentro del tratamiento de las aguas residuales domesticas con altas concentraciones de amoniac y diversas aplicaciones dentro del tratamiento, presentando datos cuantitativos respecto a los porcentajes de eficiencia en la remoción del nitrógeno amoniacal y relación costo-beneficio por su aplicación, ya que es una tecnología sostenible.

Como escenario de implementación de dicho proceso se establece las aguas residuales domesticas de la ciudad de Tunja-Boyacá por su potencial aplicación, ya que dentro de su caracterización se presenta un contenido de nitrógeno amoniacal de 20 mgN/l. La contextualización del proceso en dicho escenario se realiza por medio de un software de procesos biológicos GPS-X el cual permite determinar la viabilidad de la aplicación del proceso anammox en el tratamiento de las aguas residuales domesticas de la ciudad de Tunja, el cual se evaluará bajo condiciones operativas reales (dimensionamiento actual) y condiciones operativas ideales (dimensionamiento para obtener un THR de 9 horas).

El proceso anammox reduce el consumo de energía en sistemas de aireación, emisiones gases de efecto invernadero y producción de lodos, por lo tanto, se determinó por medio de una revisión bibliográfica que la eficiencia de remoción en el nitrógeno amoniacal es de alrededor del 83%, explicado por medio de balances de oxido reducción, siendo base para emplear una

Oxidación anaerobia del amoníaco

investigación cuasiexperimental en la implementación de un modelo matemático para la simulación de dicho proceso en el tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Tunja, evaluando el rendimiento de la oxidación del amoníaco.

La implementación del modelo permite aplicar el concepto y funcionamiento del proceso descrito en la bibliografía y con ello evaluar la remoción de contaminantes al tratar el agua cruda de la ciudad de Tunja, teniendo en cuenta las concentraciones de nitrógeno amoniacal y carga orgánica. En la simulación se obtuvieron unas eficiencias en la remoción de nitrógeno amoniacal de 98.6% y de remoción de carga orgánica del 95.6 %, para condiciones ideales del sistema, mientras que la evaluación de la eficiencia bajo condiciones reales fue del 91% para el amoníaco y del 99.8 % para la DQO, estos porcentajes de eficiencia pueden variar dependiendo el control de las condiciones operacionales.

Introducción

Los efluentes de las aguas residuales domésticas son los principales responsables de diversos problemas de contaminación en los cuerpos de agua receptores, los contaminantes contenidos en las aguas residuales provocan la baja calidad del agua y la eutrofización de las masas de agua (Wijaya, Soedjono, & Fitriani, 2017). Las aguas residuales tienen un alto contenido de nitrógeno ya que, este se encuentra presente en los residuos de alimentos y las descargas de los inodoros, en los sistemas de tratamiento el amoniac es reducido por procesos convencionales de nitrificación aeróbica y la desnitrificación, pero en los últimos años se ha implementado un proceso biológico avanzado para la reducción del nitrógeno llamado oxidación anaeróbica del amonio “Anammox” el cual es una alternativa sostenible y rentable, que oxida el amoniac utilizando nitrito como aceptor de electrones en condiciones anaeróbicas para producir gas di nitrógeno.

La aplicación de las bacterias anammox es sostenible ya que, la demanda de carbono orgánico disminuye en un 100%, los requisitos de aireación en un 60% y la producción de lodos en un 90%. Por lo tanto, este proyecto busca determinar la eficiencia del proceso de la oxidación anaerobia del amoniac, si se llegara a implantar en la planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Tunja. Esto por medio de una estructura metodológica que parte de una revisión bibliográfica de las aplicaciones del proceso anammox, definiendo los procesos, funcionamiento, transformaciones y aplicaciones en plantas de tratamiento a escala real y de esta manera recopilar información acerca de las eficiencias del proceso anammox para posteriormente plantear un modelo matemático que describa el comportamiento del proceso de la oxidación del nitrógeno amoniacal presente en las aguas residuales de la ciudad de Tunja.

Este modelo funciona como una herramienta de toma de decisiones, ya que expone los resultados del comportamiento del proceso anammox aplicado a las condiciones operativas de la planta de tratamiento de la ciudad de Tunja, con el fin de determinar su eficiencia en la remoción de los contaminantes y establecer si es viable incorporar este tipo de procesos teniendo en cuenta que debe cumplir con la legislación Colombiana vigente como la resolución 631 del

Oxidación anaerobia del amoníaco

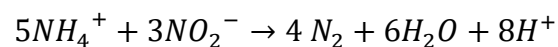
2015 y la resolución 699 del 2021, donde se estipulan los valores máximos permisibles para realizar vertimientos a cuerpos de agua superficial y al suelo como receptores finales.

1. Diagnóstico de la aplicación del proceso anammox en el tratamiento de las aguas residuales a gran escala

1.1. Conceptualización y descripción del proceso de oxidación anaerobia del amoníaco en aguas residuales domésticas

El proceso Anammox corresponde a la oxidación anaeróbica del amonio, este proceso fue descubierto a principios de los años 90 's, donde se determinó que el proceso presentaba gran potencial en la remoción del nitrógeno amoniacal (NH_4^+) y el dióxido de nitrógeno (NO_2^-) presente en las aguas residuales domésticas transformándolo en gas dinitrógeno (N_2) y agua (H_2O) (Stauffer & Spuhler, 2020). La evidencia de esta oxidación anaeróbica de amonio se basó en los balances de nitrógeno y redox en experimentos de flujo continuo, se demostró que para la oxidación de 5 moles de amonio, se requerían 3 moles de nitrito, lo que resultó en la formación de 4 moles de gas di nitrógeno (Mulder., Van de Graaf., Robertson & Kuenen, 1995) tal como se muestra en la siguiente ecuación:

Anaerobic Ammonia Oxidation



Este proceso convierte amoníaco y nitrito directamente en gas dinitrógeno, en lugar de pasar por un proceso de dos etapas de nitrificación aeróbica y desnitrificación anaeróbica conllevando a la generación de nuevas oportunidades para la investigación y el desarrollo de sistemas sostenibles de eliminación de nitrógeno. El proceso presenta diferentes beneficios, entre ellos la disminución de los costos operativos ya que requiere menor energía para la aireación, de igual manera las bacterias Anammox no requieren carbono orgánico como si lo requiere el proceso convencional de nitrificación, lo que a su vez reduce la producción de lodos de exceso y

Oxidación anaerobia del amoníaco

disminuye las emisiones de CO₂, en la siguiente figura se representa el proceso de anammox junto con la nitrificación y desnitrificación.

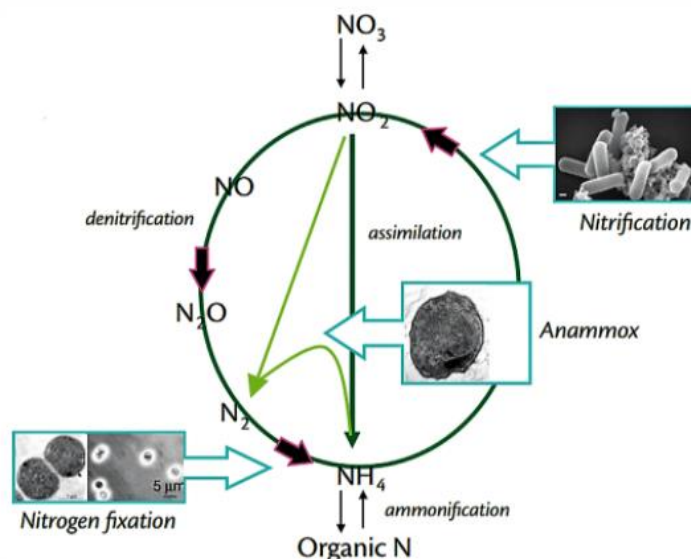


Figura 1. Ciclo del nitrógeno, tomado de: Sanabria, Bedoya & Sánchez, 2009.

Las bacterias Anammox

Las bacterias *anammox*, denominadas así por el tipo de metabolismo que realizan oxidación anaerobia de amonio (anaerobic ammonium), son microorganismos quimiolitautótrofos que oxidan el NH₄ con nitrito o nitrato como aceptor de electrones, obteniendo energía para la fijación de CO₂ y produciendo N₂, poseen una versatilidad metabólica con capacidad de oxidar cadenas de ácidos grasos en presencia de NO₂ o NO₃. Las bacterias *Anammox*, pertenecen al dominio Bacteria, Phylum *Planctomicetes*, clase *Planctomicetia*, orden *Planctomycetales* (descubiertas en 1986 por Schlessner y Stackebrandt) y a la familia *Planctomicetacea*, donde se incluyen 4 géneros, *Planctomyces*, *Pirellula*, *Gemmata* e *Isosphaera*. El proceso anammox es realizado por un grupo de microorganismos, *Planctomyces*, de los cuales 5 subgéneros son: *Brocadia*, *Kuenenia*, *Scalindua*, *Anammoxoglobus* y *Jettenia* (Sanabria, Bedoya & Sánchez, 2009).

Las bacterias *Anammox* son coloides de menos de un micrómetro de diámetro y no pueden ser cultivadas en el laboratorio por técnicas convencionales, poseen organelas de doble

Oxidación anaerobia del amoníaco

membrana, que los hacen similares a los Eucariotas y la ausencia de un polímero de peptidoglicano en su pared celular que los asemeja a las arqueas, las funciones de estas organelas están bajo estudio y se considera que en ellas se desarrolla la oxidación anaerobia de amonio, entre otras funciones se encuentran la división celular y replicación cromosómica. Las bacterias anammox contienen en la membrana del anamoxisoma lípidos ladderane, descritos como lípidos inusuales de baja energía y muy inestables, además de lípidos hopanoides que por su densidad e impermeabilidad evitan que los compuestos tóxicos intermediarios de la reacción, como la N_{24} , se dirijan al espacio extracelular y afecten las demás funciones celulares (Sanabria, Bedoya & Sánchez, 2009).

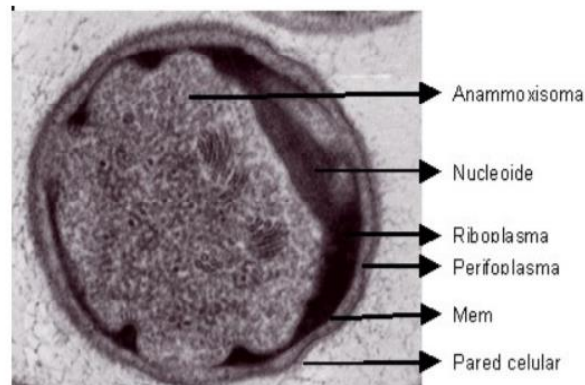


Figura 2. Microfotografía electrónica de Estructura celular, tomado de: Sanabria, Bedoya & Sánchez, 2009.



Figura 3. Muestra de lodos granulares Anammox, tomado de: (Wei., Jin & Zhang, 2020).

1.2. Caracterización del proceso anammox frente a procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales

La nitrificación y desnitrificación son reacciones químicas que ocurren dentro de células vivas o bacterias, por lo tanto, se consideran reacciones "bioquímicas", el nitrógeno es un elemento que se incorpora a compuestos orgánicos y compuestos inorgánicos debido a su capacidad para formar fácilmente enlaces químicos con otros elementos como carbono, hidrógeno y oxígeno (Gerardi, 2003). La forma convencional de eliminar los compuestos de nitrógeno presentes en el agua residual doméstica es por medio de los procesos de nitrificación y desnitrificación, la nitrificación es un proceso de dos pasos, en el primero de ellos el amoníaco se oxida primero a nitrito por bacterias oxidantes de amoníaco y/o arqueas, posteriormente a nitrato por bacterias oxidantes de nitrito, esta división del trabajo entre los dos grupos funcionales es una característica generalmente aceptada del ciclo biogeoquímico del nitrógeno (van Kessel., Speth & Albertsen, 2015). Por otra parte, la desnitrificación es definida como "la reducción microbiana de nitrato o nitrito a nitrógeno gaseoso ya sea como nitrógeno molecular o como óxido de nitrógeno. La desnitrificación se refiere a la reducción por bacterias esencialmente aeróbicas, de una o ambos de los óxidos de nitrógeno iónicos (nitrato, NO_3 , y nitrito, NO_2) a los óxidos gaseosos (óxido nítrico, NO y óxido nitroso, N_2O), que pueden reducirse aún más a dinitrógeno (N_2). Los óxidos de nitrógeno actúan como aceptores terminales de electrones en ausencia de oxígeno (Knowles, 1982).

Actualmente, las prácticas de tratamiento de aguas residuales pueden mejorarse significativamente mediante la introducción de nuevas tecnologías de tratamiento microbiano. Para cumplir con los estándares de descarga cada vez más estrictos, se deben implementar nuevas aplicaciones y estrategias de control para la eliminación sostenible de amonio de las aguas residuales (Peng & Zhu, 2006).

1.3. Aplicaciones del proceso Anammox dentro un sistema de tratamiento

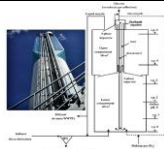
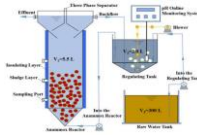

El primer reactor Anammox a escala real se puso en funcionamiento en 2002 en la planta de tratamiento de lodos Sluisjesdijk en Rotterdam y al demostrar los beneficios tanto económicos

Oxidación anaerobia del amoniaco

como ambientales de implementar el proceso anammox para la eliminación de nitrógeno, se ha puesto en marcha en más de 100 plantas a gran escala en todo el mundo, a continuación, se describe la eficiencia de algunas de estas plantas de tratamiento.

Tabla 1.

Aplicación del proceso anammox en plantas de tratamiento de aguas residuales a gran escala.

País/Ciudad	Nombre de la planta	Características y/o procesos	Eficiencia del proceso anammox	Beneficios	Imagen
Rotherdam, países bajos	Waterboard Hollandse Delta	Cuenta con un reactor a gran escala de 70 m ³ para tratar 500 kg-N / d, tiene una capacidad de 620.000 equivalentes de población y consta de un proceso AB de dos etapas. Waterboard Delta Hollandse fue el primero para decidir sobre anammox como el procedimiento preferido para la recuperación de nitrógeno del agua de rechazo.	Su eficiencia de remoción es de más del 95% del amonio y más del 85% del nitrógeno del agua de rechazo, mientras que solo requiere 72 m ³ de espacio.	La tecnología Anammox ahorra más de 250 toneladas de metanol al año y 275.000 kWh de energía eléctrica. La producción de lodos del tratamiento de aguas de rechazo se reduce en 40 toneladas de materia seca. También genera ahorros anuales de € 125,000 en costos operativos y una reducción de la huella de carbono de STW en 500 toneladas por año.	
China	Las aguas residuales del campus de la Universidad Tecnológica de Guilin	Los procesos de tratamiento de aguas residuales más comunes utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en China incluyen los procesos anaeróbico / anóxico/óxico (A2/O). Las cantidades de inoculación de los lodos nitrificantes parciales y ANAMMOX fueron 1500 y 300 mL, respectivamente, y las concentraciones fueron 2000 y 3000 mg / L. El tanque tiene una capacidad de llenado de 2 L. Combina la digestión anaerobia y el proceso anammox, planta de tratamiento de agua residual capaz de generar energía verde, en la cual se procesan residuos de mataderos donde se convierten en biocombustibles, se combinan procesos de digestión anaerobia y procesos anammox para tener eficiencia en la remoción de materia orgánica y nitrógeno amoniacal, así como el aprovechamiento de biogás producido en el proceso	Las tasas de eliminación de DQO, NH ₄ + -N y TN fueron aproximadamente del 89%, 96,7% y 70%, respectivamente	estos procesos son capaces de ahorrar energía que podría satisfacer a más de 300.000 viviendas, además del ahorro de energía y la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero	
Holanda	Empresa Redac Son y la compañía Paques	Innovador sistema que combina, en un solo reactor, tratamiento anaerobio, tratamiento aeróbico, decantación de sólidos y lavado del biogás. Ideal para tratar el desagüe doméstico de poblaciones de 5.000 a 200.000 habitantes (barrios y municipios).	Se obtuvo una eficiencia media de tratamiento de DQO y DBO del 87% y 90% en Tupi y del 80% y 83% en Igaracu do Tietê, respectivamente. Se observó nitrificación en la planta de Tupi, lo que resultó en una eliminación del 71% de TKN y del 83% de NH ₄ -N	la eficiencia en la eliminación del nitrógeno amoniacal fue del 62% con respecto a la concentración del efluente	

Elaborado por: Autores

2. Caracterización del agua residual doméstica de la planta de tratamiento de agua residual de Tunja-Boyacá

2.1 Descripción de la PTAR de la ciudad de Tunja

Tunja, capital del departamento de Boyacá, se encuentra localizada a una altura de 2.783 msnm, con una extensión urbana de 19,7661 Km² corresponden al área urbana, según el Plan de Ordenación y Manejo Ambiental –POMCA (2006) de la cuenca alta del río Chicamocha, los factores que más han incidido a la contaminación de la cuenca son la descarga de aguas residuales urbanas sin tratar, al igual que la de efluentes industriales.

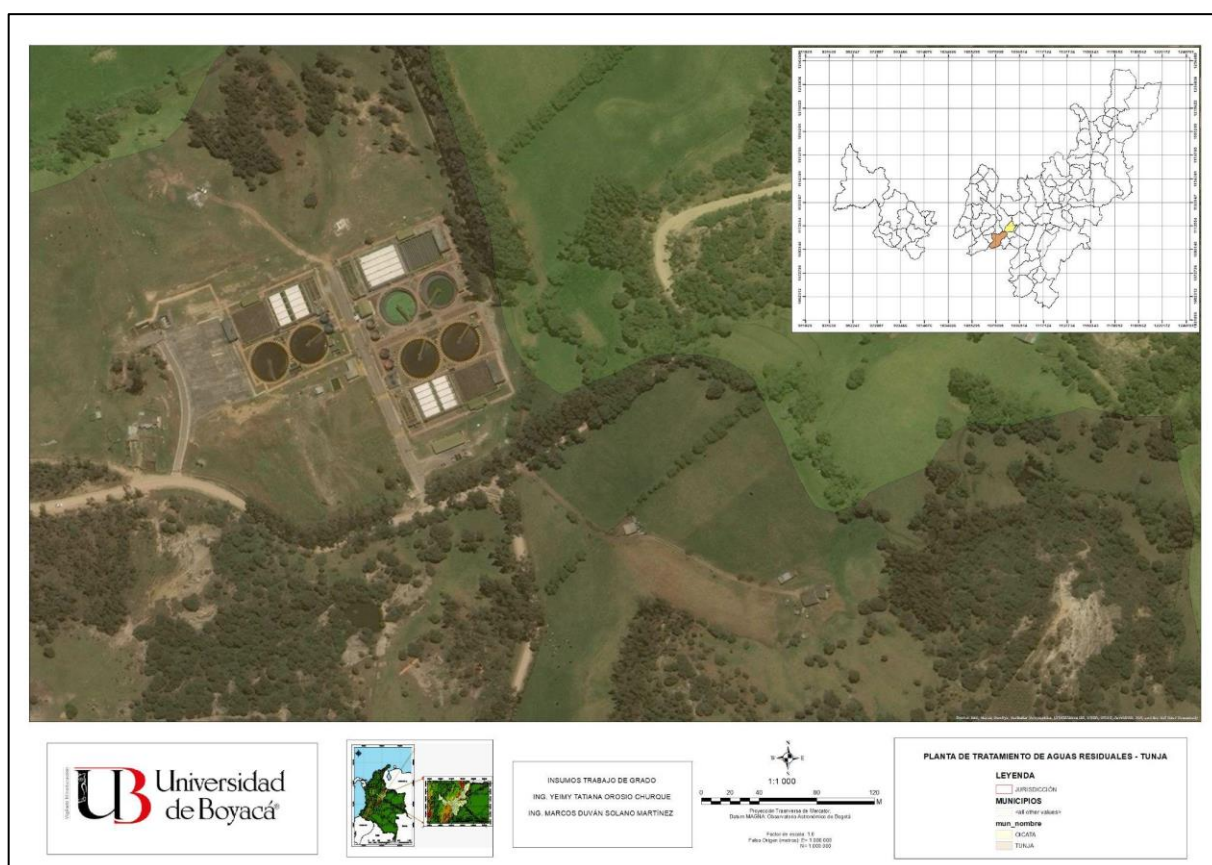


Figura 4. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (VEOLIA) Tunja – Boyacá, elaborado por: Autores

El proyecto para la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales – PTAR de la ciudad de Tunja, empezó a consolidarse en el año 2006, nació como parte del Programa

Oxidación anaerobia del amoníaco

Saneamiento Para Vertimientos –SAVER, y entró en funcionamiento en el año 2017 con dos de sus tres módulos construidos. Actualmente la planta está a cargo de Proactiva Aguas de Tunja, empresa prestadora del servicio de acueducto y alcantarillado. La PTAR de Tunja busca remover y tratar en un 80% la carga contaminante del municipio sobre la cuenca y contribuir al saneamiento del río Jordán y la cuenca alta del río Chicamocha, las estructuras cuentan con la capacidad de tratar 450 litros de agua por segundo. Según el informe ejecutivo de modificaciones al Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos – PSMV de Tunja, la PTAR se proyectó en módulos autónomos para cubrir de manera paulatina el crecimiento de la ciudad (Contreras & García, 2005).

El proceso de tratamiento de las aguas residuales en la PTAR es de tipo biológico, y comprende una fase anaeróbica seguido de una fase aerobia de bajo consumo energético y una alta eficiencia de remoción. El tratamiento preliminar está compuesto por una rejilla auto limpiante encargada de remover sólidos de gran tamaño y un desarenador que separa del agua las arenas, gravas y cenizas. El tratamiento secundario se vale de un reactor anaerobio de flujo ascendente UASB (tratamiento anaerobio), un tanque de aireación (tratamiento aerobio) y un sedimentador secundario. Durante el tratamiento anaerobio se degrada la materia orgánica por la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. Posteriormente, durante el tratamiento aerobio las aguas reciben un proceso biológico en donde microorganismos en presencia de oxígeno se alimentan de la materia orgánica remanente del tratamiento anterior, convirtiéndola en subproductos como gas carbónico, agua y nuevos microorganismos. Por su parte, el sedimentador secundario remueve los sólidos que se han sedimentado a la salida del tanque de aireación. Finalmente, el tratamiento de subproductos está compuesto por un espesador de lodos, un deshidratador centrífugo (deshidratación de lodos para su disposición final), un quemador de biogás (combustión del gas metano proveniente del reactor anaerobio UASB) y un lavado H_2S , con dichos procesos se presenta una remoción de la carga contaminante cercanos al 80 %, lo que implica una mejora en las condiciones de salud pública para los tunjanos y asegurará, con la recuperación integral de los ríos de la ciudad, un escenario medioambiental óptimo (Contreras & Garcia, 2005).

2.2. Caracterización del agua residual de la ciudad de Tunja

A continuación, se presenta la caracterización del agua residual tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales (VEOLIA) Tunja.

Tabla 2.

Medición de los parámetros medidos en campo de agua residual cruda de Tunja

	Parámetros in- situ	Unidad	Valor
Medidos en campo	CAUDAL	(L/s)	450
	pH		7.77
	TEMPERATURA	C°	18.9
	OXIGENO DISUELTO	mg(O ₂)/L	6.66

Elaborado por: Autores

Tabla 3.

Parámetros fisicoquímicos del agua residual

	Constituyentes	Unidad	Concentración
Laboratorio de aguas proactiva	BDO5	mg/L	537
	DQO	mg/L	752
	fosforo reactivo total	mg/L	21.81
	grasas y aceites	mg/L	107
	nitratos	mg/L	<0.1
	nitritos	mg/L	<0.007
	oxígeno disuelto	mg(O ₂)/L	0.68
	solidos suspendidos totales	mg/L	363
	coliformes fecales	NMP/100ml	1.5*10 ⁻⁷
	coliformes termo tolerantes	NMP/100ml	1.85*10 ⁷
coliformes totales	NMP/100ml	3.448*10 ⁸	

Elaborado por: Autores

Oxidación anaerobia del amoníaco

En la tabla 2 se muestra la concentración de los parámetros que por su naturaleza se deben medir in situ ya que cambian su concentración con facilidad, como lo son el pH, temperatura y oxígeno disuelto, en la tabla 3 se muestra la concentración de los constituyentes físicos, químicos y microbiológicos que aportan a la baja calidad del agua, los cuales son los que se requieren remover para cumplir con los valores máximos establecidos en la legislación colombiana vigente.

3. Formulación e implementación del modelo del proceso Anammox

3.1 Modelo del proceso de la oxidación anaerobia del amoníaco en aguas residuales domésticas mediante el simulador GPS-X

El primer simulador dinámico de una planta de tratamiento de aguas residuales lanzado comercialmente es GPS-X, siendo la herramienta más avanzada empleada en el modelado matemático, control, optimización y gestión de plantas de tratamiento de aguas residuales. GPS-X ofrece modelos calibrados y un conjunto más completo de procesos unitarios, con análisis de sensibilidad, administrador de escenarios y análisis estadístico de diferentes procesos (Hydromantis, 2021). Con base en lo anterior, se plantea un esquema de proceso Anammox en el software de GPS-X, donde el efluente contiene las características del agua residual cruda que entra a la planta de tratamiento de la ciudad de Tunja, esto se establece por medio del “concejero del efluente” el cual usa una relación matemática entre los parámetros para establecer su concentración. En la siguiente figura se presentan las concentraciones de los parámetros del agua residual cruda del municipio de Tunja en la composición del afluente en el modelo.

Oxidación anaerobia del amoniac

Influent Advisor - Library: mantis2lib - Influent Model: codstates - Biological Model: mantis2

User Inputs				State Variables				Composite Variables			
- Influent Composition				- Soluble Gases				- Solids Variables			
cod	total COD	gCOD/m3	752.0	so	dissolved oxygen	gO2/m3	6.66	x	total suspended solids	g/m3	363.3
tkn	total TKN	gN/m3	40.0	+ Other Soluble Gases				vss	volatile suspended solids	g/m3	29.8
tp	total phosphorus	gP/m3	21.81	+ Other Soluble Organic Variables				xiss	total inorganic suspended s...	g/m3	333.5
- Nitrogen Compounds				+ Other Particulate Organic Compounds				ivt	VSS/TSS ratio	gVSS/gTSS	0.082
snh	ammonia nitrogen	gN/m3	20.0	- Nitrogen Variables				- Organic Variables			
snoi	nitrite	gN/m3	0.007	snh	ammonia nitrogen	gN/m3	20.0	scod	soluble COD	gCOD/m3	737.7
snoa	nitrate	gN/m3	0.1	snoi	nitrite	gN/m3	0.007	cod	total COD	gCOD/m3	752.0
- Phosphorus Compounds				snoa	nitrate	gN/m3	0.1	sbod	soluble cBOD5	gO2/m3	528.9
sp	ortho-phosphate	gP/m3	8.0	+ Other Nitrogen Variables				bod	total cBOD5	gO2/m3	536.6
xpp	stored poly-phosphate in PAO	gP/m3	0.5	- Phosphorus Variables				stbod	soluble cnBOD5	gO2/m3	630.4
- Influent Fractions				sp	ortho-phosphate	gP/m3	8.0	ttbod	total cnBOD5	gO2/m3	719.4
ivstotss	VSS/TSS ratio	gVSS/gTSS	0.082	+ Other Phosphorus Variables				sfa	volatile fatty acids	g/m3	0.0
- Organic Fractions				- Biomass Variables				+ Other Organic Variables			
frsi	soluble inert fraction of total ...		0.0001	xbh	heterotrophic biomass	gCOD/m3	7.52	- Nitrogen Variables			
frss	readily biodegradable fractio...		0.98	xbai	ammonia oxidizer biomass	gCOD/m3	0.0	snox	nitrite and nitrate	gN/m3	0.107
frxi	particulate inert fraction of t...		0.001	xbaa	nitrite oxidizer biomass	gCOD/m3	0.0	tkn	total TKN	gN/m3	40.0
frscol	colloidal fraction of slowly bi...		0.1	xbp	phosphate accumulating bi...	gCOD/m3	0.0	tn	total nitrogen	gN/m3	40.1
- Nitrogen Fractions				xbf	fermenting biomass	gCOD/m3	0.0	tninert	total inert organic nitrogen	gN/m3	0.0113
frsnh	ammonium fraction of solub...		0.9	xbpro	acetogenic biomass	gCOD/m3	0.0	+ Other Nitrogen Variables			
inshi	N content of soluble inert m...	gN/gCOD	0.1	xbacm	acetoclastic methanogenic ...	gCOD/m3	0.0	- Phosphorus Variables			
inshi	N content of inert particulate...	gN/gCOD	0.005	xbh2m	hydrogenotrophic methano...	gCOD/m3	0.0	stp	soluble total phosphorus	gP/m3	8.01
- Phosphorus Fractions				xbmet	methylytrophic biomass	gCOD/m3	0.0	tp	total phosphorus	gP/m3	21.8
ipssi	P content of soluble inert ma...	gP/gCOD	0.1	xbax	anammox biomass	gCOD/m3	0.0	tpinert	total inert organic phosphorus	gP/m3	0.0827
ipshi	P content of inert particulate...	gP/gCOD	0.1	- Carbon Variables				+ Other Phosphorus Variables			
- pH and Alkalinity				stic	total soluble inorganic carbon	gC/m3	62.3	+ Other Biomass Variables			

Figura 5. Consejero del afluente, elaborado por: Autores

Una vez ajustados los valores de la caracterización del agua residual en el afluente, se plantea todo el esquema del proceso, para este esquema se tomó como referencia la modelación de los procesos de nitrificación y anammox en GPS-X expuestos en el seminario de modelación de hydromatis, el cual cuenta con un proceso de lodos activados que es implementado en el tratamiento de aguas residuales y se fundamenta en la utilización de microorganismos (bacterias heterótrofas facultativas), que crecen en el agua residual, convirtiendo la materia orgánica disuelta en productos más simples como nuevas bacterias, dióxido de carbono y agua, este proceso está conformado por un sedimentador primario, un tanque de aireación y un sedimentador secundario, esto con el fin de remover u oxidar la carga orgánica y con ello promover el crecimiento de microorganismos que toman como fuente de energía los nutrientes presentes en dicha materia orgánica, como lo es el fosforo y el nitrógeno biodegradable, posterior a este proceso se conecta el lodo que resulta del sedimentador secundario con un digester anaerobio que cumple el papel de estabilizar el lodo en condiciones anaerobias, en esta estructura se presenta una actividad metabólica por parte de los microorganismos anaerobios u/o anaerobios facultativos y debido a esto se aumenta la temperatura a un promedio de 35 °C, es decir que aparecen microorganismos termófilos.

Posteriormente este flujo pasa a través de un lecho de secado en el cual se deshidratan los lodos para su disposición final y de este se obtiene un caudal con alto contenido de nitrógeno amoniacal, el cual es oxidado a nitrito (NO_2) esto se logra por medio de un tanque aerobio donde se realiza el proceso de nitrificación parcial convencional, el cual requiere de oxígeno

Oxidación anaerobia del amoníaco

disuelto que será utilizado por bacterias lito-Autótrofas para transformar el NH_3 a NO_2^- ; el caudal proveniente del tanque de aireación tiene una alta concentración de nitrito la cual es usada como agente oxidante para el proceso anammox que se lleva a cabo en un tanque anaerobio, allí el nitrito es transformado por las bacterias anammox a nitrógeno gaseoso, el efluente de este tanque se conecta a la centrifuga que separa la biomasa del agua ya tratada en el tanque anammox y la recircula nuevamente a todo el proceso y la semilla anammox se reintegra al tanque anaerobio como se muestra a continuación.

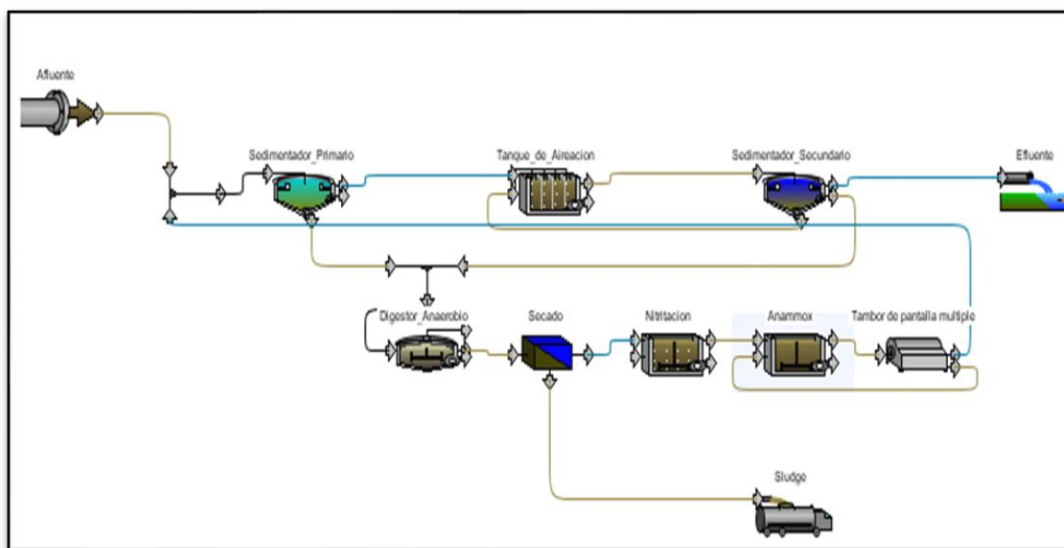


Figura 6. Esquema del proceso Anammox modelado mediante GPS-X, elaborado por: Autores.

Para dar cumplimiento al objetivo del trabajo y determinar la eficiencia del proceso, se plantean dos modelos, el primero de ellos cuenta con las condiciones operativas de la planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Tunja, es decir el caudal y el volumen de cada uno de los elementos que conforman el sistema; el segundo donde se trata el mismo caudal pero con un volumen que garantice un tiempo hidráulico de retención de 9 horas, tiempo necesario para que las bacterias anammox oxiden el nitrógeno amoniacal.

Oxidación anaerobia del amoníaco

3.1.1. Planteamiento del modelo en condiciones operativas reales.

Para la formulación de este modelo se tomó como referencia el informe técnico de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Tunja, donde se especifican las dimensiones de cada uno de los elementos que conforman dicho sistema, como se muestra a continuación.

Tabla 4.

Condiciones técnicas de la PTAR de la ciudad de Tunja

Especificaciones técnicas				
Elemento	Dimensionamiento			CAUDAL (L/s)
	VOLUMEN (m ³)	ÁREA (m ²)	ALTURA ÚTIL (m ²)	
SEDIMENTADORES	1945	432	4.5	
TANQUES DE AIREACIÓN	2469	588	4.2	
DIGESTOR ANAEROBIO	2895	579	5	450
TANQUE ANNAMOX	2469	588	4.2	

Elaborado por: Autores

Luego de definir las dimensiones de cada uno de los elementos que conforman el sistema, se especifica el modelo Carbono-Nitrógeno, fósforo y pH (mantis2lib), evaluando el comportamiento del nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato, gas di nitrógeno soluble, demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) y la producción de biomasa anammox.

3.1.2. Planteamiento del modelo en condiciones operativas ideales

El segundo modelo opera con un caudal en el afluente de 38880 m³/d y un tiempo hidráulico de retención de 9 horas, por lo tanto, se busca que las estructuras tengan un volumen que garantice dicho tiempo de retención y basados en la fórmula de tiempo hidráulico se obtiene:

Oxidación anaerobia del amoniaco

$$THR = \frac{V}{Q}$$

Despejando V

$$V = THR * Q$$

Reemplazando

$$V = 0.375 \text{ d} * 38880 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

$$V = 14580 \text{ m}^3$$

Dicho volumen se plantea para cada una de las estructuras que conforman el proceso de remoción anaerobia del amoniaco, el tipo de modelo a utilizar comprende una relación de Carbono-Nitrógeno, fosforo y pH (mantis2lib). Una vez ajustados todos los valores de entrada al sistema, se procede a simular el comportamiento del proceso planteado en estado estacionario (la concentración no varía en el tiempo) con fin de determinar los valores de remoción, evaluando el comportamiento del nitrógeno amoniacal, nitrito, nitrato, gas di nitrógeno soluble, demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) y la producción de biomasa anammox.

3.2 Análisis de resultados de la modelación del proceso Anammox

A continuación, se presentan los resultados obtenidos dentro de cada uno de los modelos teniendo en cuenta los componentes hidráulicos que integran el proceso Anammox modelado mediante el programa de simulación de tratamiento del agua residual GPS-X. Estos resultados se presentan siguiendo la secuencia de esquema anteriormente planteado, desde el tratamiento preliminar de remoción de carga orgánica de lodos activados, seguido del proceso anammox que inicia con el tanque de digestión anaerobia y finaliza con el tambor de pantallas múltiples o centrifuga.

3.2.1 Análisis de resultados basados en las condiciones operativas de Tunja

3.2.1.1 Afluente.

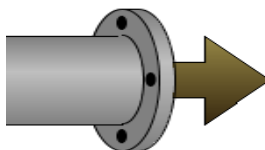


Figura 7. Afluente del sistema, elaborado por: Autores mediante GPS-X

Tabla 5.

Caracterización del afluente

Resultados de la simulación			
Influent Composition			
TotalCOD	752	[gCOD/m3]	
total TKN	40	[gN/m3]	
total phosphorus	21.8	[gP/m3]	
Nitrogen Compounds			
ammonia nitrogen	20	[gN/m3]	
nitrite	0.007	[gN/m3]	
nitrate	0.1	[gN/m3]	
Phosphorus Compounds			
ortho-phosphate	8	[gP/m3]	
stored poly-phosphate in PAO	0.5	[gP/m3]	
Influent Fractions			
VSS/TSS ratio	0.082	[gVSS/gTSS]	
Organic Fractions			
soluble inert fraction of total COD	0.0001	[-]	
readily biodegradable fraction of total COD	0.98	[-]	
particulate inert fraction of total COD	0.001	[-]	

Oxidación anaerobia del amoniac

colloidal fraction of slowly biodegradable

COD 0.1 [-]

Elaborado por: Autores

Los resultados expuestos en la tabla 5 evidencia las concentraciones de los constituyentes obtenidos a partir del ajuste del concejero del afluente con las respectivas fracciones orgánicas, las cuales aportan a los resultados del modelo matemático en cada una de las estructuras o procesos que integran el modelo.

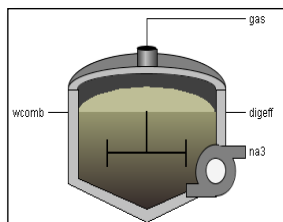
3.2.1.2 Digestor anaerobio.

Figura 8. Tanque Digestor Anaerobio, elaborado por: Autores mediante GPS-X

Tabla 6.

Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del digestor anaerobio

		Resultados de simulación		
		wcomb	digeff	na3
Flow	m3/d	40	40	0
TSS	mg/L	17349.75	14828.193	14828.193
VSS	mg/L	1192.772	85.898072	85.898072
COD	mg/L	1530.126	168.18814	168.18814
Ammonia N	mgN/L	21.15246	622.27363	622.27363
Soluble PO4-P	mgP/L	14.43919	471.59588	471.59588
TP	mgP/L	481.0111	480.98984	480.98984
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	270.9159	2769.5351	2769.5351

Oxidación anaerobia del amoniac

pH	-	7.75489	8.6944046	8.6944046
DO	mgO ₂ /L	0	0	0

Elaborado por: Autores

En los resultados expuestos en la tabla 6 se puede observar las concentraciones obtenidas dentro del tanque de digestión anaerobia, en los cuales por la actividad metabólica de las bacterias anaerobias allí presentes, transforma una fracción de la demanda química de oxígeno de 0.78, adicionalmente por las condiciones anaerobias en las que se encuentra las bacterias se presenta un aumento en las concentraciones de solidos suspendidos totales y del nitrógeno debido a la oxidación parcial del amoniac, la cual será usado como nutriente en el posterior proceso del tratamiento.

3.2.1.3 Tanque de Nitrificación.

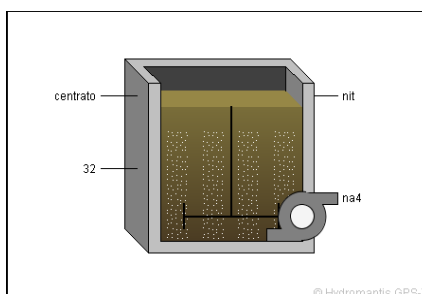


Figura 9. Tanque de Nitrificación, elaborado por: Autores mediante GPS-X

Tabla 7.

Resultados obtenidos dentro del tanque de nitrificación

		Resultados de simulación		
		centrato	Internal	Nit
MLSS	mg/L	741.4096	754.77872	754.77872
MLVSS	mg/L	4.294904	10.700991	10.700991
Soluble COD	mg/L	38.99121	1.0077754	1.0077754
Ammonia N	mgN/L	622.2736	234.34301	234.34301

Tabla 8.*Resultados de la simulación en el tanque anammox*

Resultados de simulación				
		nit	Internal	Amx
MLSS	mg/L	754.7787	2514.5853	2514.5853
MLVSS	mg/L	10.70099	52.99041	52.99041
Soluble COD	mg/L	1.007775	1.3604805	1.3604805
Ammonia N	mgN/L	234.343	1.8256773	1.8256773
Nitrite N	mgN/L	383.1079	79.440915	79.440915
Nitrate N	mgN/L	0.001957	52.992665	52.992665
Soluble PO4-P	mgP/L	469.6168	471.01285	471.01285
TP	mgP/L	472.0802	472.96636	472.96636
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	1385.069	365.25912	365.25912
pH	-	5.636177	6.293602	6.293602
HRT	h	-	1768.5804	-
DO	mgO2/L	-	0.0016006	-
Total OUR	mgO2/(L.h)	-	0.0011073	-
Nitrification				
Rate	mgN/(L.h)	-	0.1295009	-
Nitrate Util. Rate	mgN/(L.h)	-	0.0024519	-

Elaborado por: Autores

En la tabla 8 se muestran los resultados del proceso anammox, donde se puede evidenciar que el proceso remueve en gran parte la concentración del nitrógeno amoniacal registrando en su efluente un valor de 1.82 mgN/L, es decir oxido 232.53 mgN/L del nitrógeno total que ingreso al reactor, adicionalmente se oxido el nitrito formado en el tanque aerobio durante el proceso de nitrificación parcial con un valor de 303.66 mgN/L.

Oxidación anaerobia del amoníaco

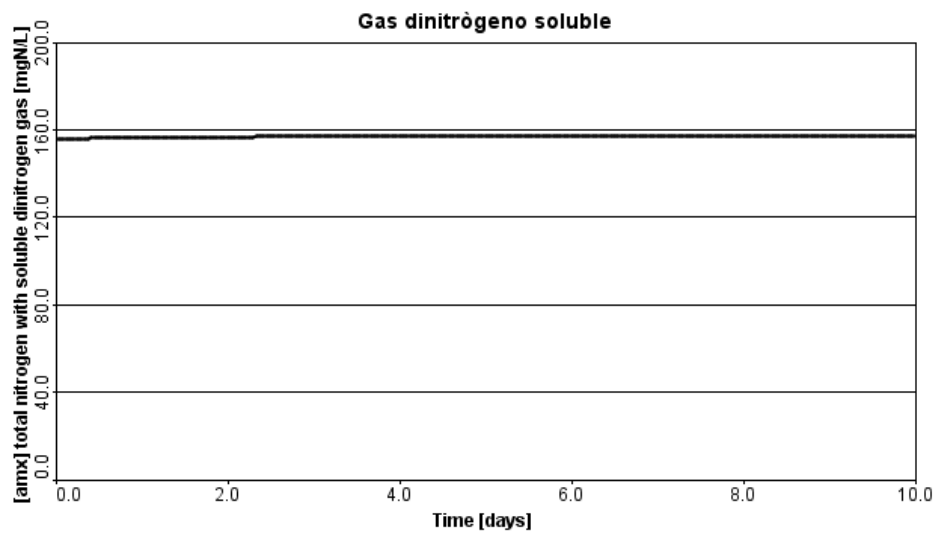


Figura 11. Concentración de gas di nitrógeno soluble en el tanque Anammox, elaborado por: autores por medio de GPS-X

Como se puede observar en la figura 11 la concentración en el tanque Anammox de gas di nitrógeno es de 157 mg/l resultante de la transformación de nitrito a gas di nitrógeno por medio del proceso anammox.

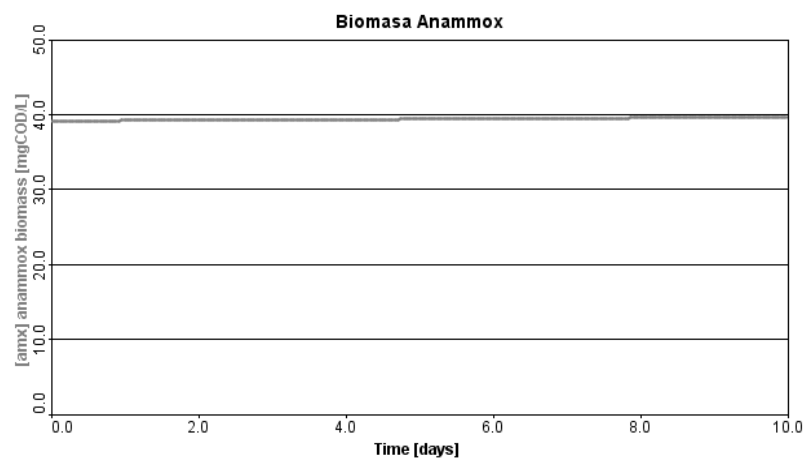
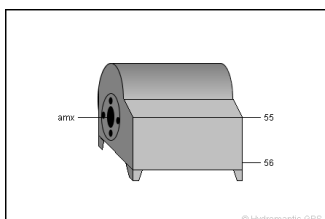


Figura 12. Concentración de bacterias anammox, elaborado Autores por medio de GPS-X

Adicionalmente en la figura 12 se muestra la producción de bacterias anammox en el reactor anaerobio producto del metabolismo para oxidar los nitritos a gas di nitrógeno la cual fue de 39.4 mg/L.

Oxidación anaerobia del amoniaco

3.2.1.5 Centrifuga.**Figura 13.** Pantalla múltiple, elaborado por: autores por medio de GPS-X**Tabla 9.**

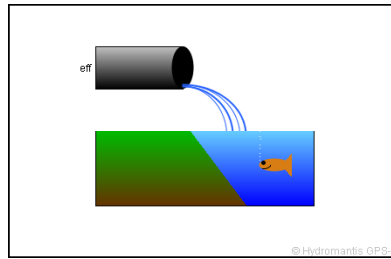
Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del tambor de pantallas múltiples

Resultados de simulación				
		amx	55	56
Flow	m3/d	39.28571	38.5	0.7857143
TSS	mg/L	2514.585	766.69691	88161.114
COD	mg/L	77.60477	38.506747	1993.408
Ammonia N	mgN/L	1.825677	1.8256773	1.8256773
Soluble PO4-P	mgP/L	471.0128	471.01285	471.01285
TP	mgP/L	472.9664	472.04803	517.96414
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	365.2591	365.25912	365.25912
pH	-	6.293602	6.293602	6.293602
DO	mgO2/L	0.001601	0.0016006	0.0016006

Elaborado por: Autores

La centrifuga tiene la función de separar los sólidos suspendidos del agua por medio de movimientos rotativos, en la tabla 9 se presentan una producción de solidos suspendidos totales de 767 mg/L, los cuales se recirculan al tanque anammox como semilla y concentración alta de bacterias anammox para continuar con el proceso de oxidar el nitrógeno amoniacal.

Oxidación anaerobia del amoniac

3.2.1.6. Efluente.**Figura 14.** Efluente del sistema, elaborado por: Autores por medio de GPS-X**Tabla 10.***Resultados de las concentraciones obtenidas del efluente del sistema*

Resultados de simulación		
		eff
Flow	m ³ /d	38878.5
TSS	mg/L	311.2217
VSS	mg/L	17.78416
cBOD5	mg/L	532.5111
COD	mg/L	746.77
Ammonia N	mgN/L	21.54276
Nitrite N	mgN/L	0.063613
Nitrate N	mgN/L	0.128138
TKN	mgN/L	39.3588
TN	mgN/L	39.55055
Soluble PO ₄ -P	mgP/L	16.43292
TP	mgP/L	21.7834
Total Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	273.9321
pH	-	7.75489
DO	mgO ₂ /L	3.004955

Elaborado por: Autores

Oxidación anaerobia del amoniaco

Una vez finalizados todos los procesos y determinadas las concentraciones como lo expone la tabla 10, el agua es vertida a un cuerpo receptor con una concentración de nitrógeno amoniacal de 21.5 mg/L tal y como se muestra en la figura 15, además otro constituyente importante a evaluar es la concentración de carga orgánica contaminante que será vertida la cual tiene una concentración de 746.77 mg/L.

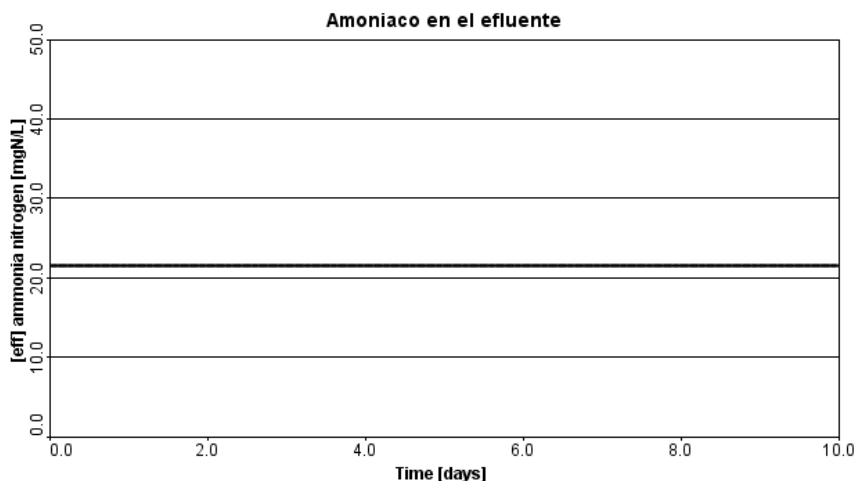


Figura 15. Concentración de nitrógeno amoniacal en el efluente, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

3.2.2 Análisis de resultados para un tiempo de retención de 9 horas.

3.2.2.1 Digestor anaerobio.

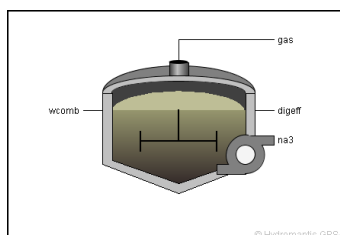


Figura 16. Tanque Digestor Anaerobio, elaborado por: Autores mediante GPS-X

Tabla 11.

Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del digestor anaerobio

Oxidación anaerobia del amoniac

Resultados de simulación				
		wcomb	digeff	na3
Flow	m3/d	40.00	40.00	0.00
TSS	mg/L	21928.40	13895.85	13895.85
VSS	mg/L	6340.09	296.90	296.90
COD	mg/L	8786.51	449.32	449.32
Ammonia N	mgN/L	12.29	1033.64	1033.64
Soluble PO4-P	mgP/L	11.91	555.36	555.36
TP	mgP/L	565.03	565.03	565.03
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	237.55	4338.67	4338.67
pH	-	7.62	7.25	7.25
DO	mgO2/L	0.00	0.00	0.00

Elaborado por: Autores

Los resultados de la tabla 11 indican las concentraciones de los diferentes constituyentes en el digester anaerobio, el cual estabiliza el caudal del tratamiento previo de lodos activados (sedimentar primario, tanque de aireación y sedimentador secundario), arrojando concentraciones en los constituyentes de nitrógeno amoniacal de 1 mgN/L y demanda química de oxígeno de 449.32 mg/L, concentraciones obtenidas a través del flujo de 40 m3/d que entra al digester anaerobio.

3.2.2.2 Tanque de aireación (nitrificación).

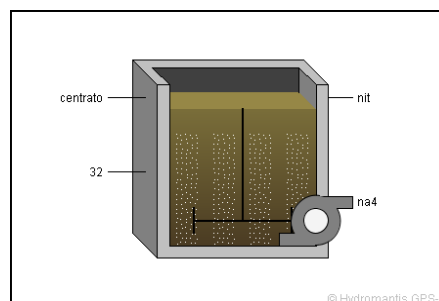


Figura 17. Tanque de Nitrificación, elaborado por: Autores mediante GPS-X

Oxidación anaerobia del amoníaco

Una vez tratada el agua en el digestor anaerobio se realiza una nitrificación parcial, donde se obtiene las siguientes concentraciones:

Tabla 12.

Resultados obtenidos dentro del tanque de nitrificación

Resultados de simulación				
		centrato	Internal	nit
MLSS	mg/L	694.79	696.21	696.21
MLVSS	mg/L	14.84	16.20	16.20
Soluble COD	mg/L	8.32	0.91	0.91
Ammonia N	mgN/L	1033.64	427.71	427.71
Nitrite N	mgN/L	0.00	600.17	600.17
Nitrate N	mgN/L	0.00	0.00	0.00
Soluble PO4-P	mgP/L	555.36	555.41	555.41
TP	mgP/L	555.85	555.88	555.88
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	4338.75	2176.60	2176.60
pH	-	7.34	5.81	5.81
HRT	h	-	9088.82	-
DO	mgO2/L	-	2.00	-
Total OUR	mgO2/(L.h)	-	0.23	-
Nitrification				
Rate	mgN/(L.h)	-	0.07	-
Nitrate Util.				
Rate	mgN/(L.h)	-	0.00	-
Total Air Flow	m3/h	-	87.41	-
SOTE	%	-	30.00	-
Actual OTR	kg/h	-	3.33	-

Elaborado por: Autores

Oxidación anaerobia del amoniaco

la tabla 12 presenta las concentraciones de los constituyentes dentro del tanque de nitrificación, esta información permite evidenciar el comportamiento expuesto del proceso Anammox, además en la figura 18 se presenta una concentración de nitritos de 600.17 mgN/L producida a partir de la nitrificación parcial del amonio, la cual se empleará como agente oxidante por las bacterias anammox en la oxidación reducida formando nitrógeno gaseoso, además se evidencia disminución en la concentración del nitrógeno amoniacal con un valor de 427.71 mgN/L.

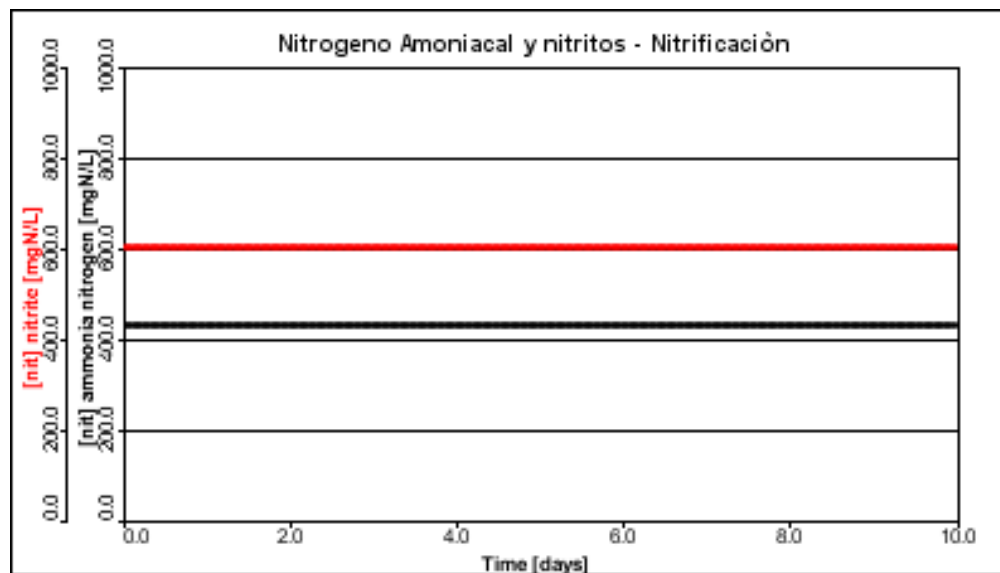


Figura 18. Concentración de nitrógeno amoniacal y nitritos dentro del tanque de Nitrificación, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

3.2.2.3 Tanque Anammox.

Resultados de la oxidación anaerobia de amoniaco en un tanque Anammox

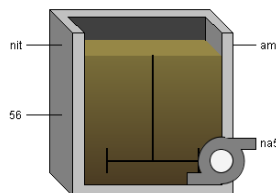


Figura 19. Tanque Anammox, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

Tabla 13.

Oxidación anaerobia del amoníaco

Resultados de la simulación en el tanque anammox

Resultados de simulación				
		nit	Internal	amx
MLSS	mg/L	696.31	2362.71	2362.71
MLVSS	mg/L	16.20	90.28	90.28
Soluble COD	mg/L	0.91	1.61	1.61
Ammonia N	mgN/L	427.65	0.28	0.28
Nitrite N	mgN/L	600.08	32.46	32.46
Nitrate N	mgN/L	0.00	96.52	96.52
Soluble PO4-P	mgP/L	555.63	555.11	555.11
TP	mgP/L	556.10	557.57	557.57
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	2176.29	305.67	305.67
pH	-	5.81	6.64	6.64
HRT	h	-	8907.05	-
DO	mgO2/L	-	0.01	-
Total OUR	mgO2/(L.h)	-	0.00	-
Nitrification Rate	mgN/(L.h)	-	0.05	-
Nitrate Util. Rate	mgN/(L.h)	-	0.00	-

Elaborado por: Autores

La tabla 13 presenta los resultados de las concentraciones obtenidas dentro del tanque Anammox, se evidencia la oxidación tanto del nitrógeno amoniacal al pasar de una concentración de 427.65 mgN/L en el tanque anaerobio a una concentración de 0.28 mgN/L en el tanque anammox, además de una oxidación de nitrito de 32.46 mgN/L como se observa en la figura 20 y figura 21

Oxidación anaerobia del amoniaco

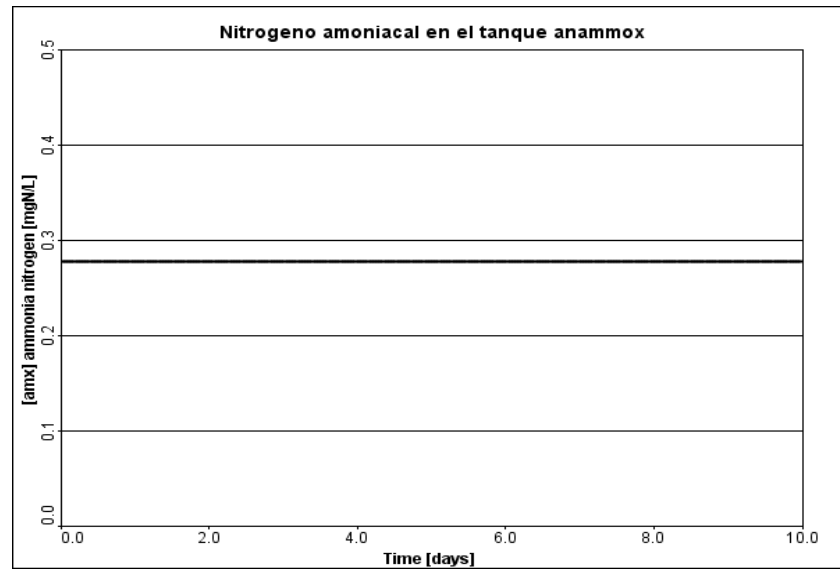


Figura 20. Concentración de nitrógeno amoniacal en el tanque Anammox, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

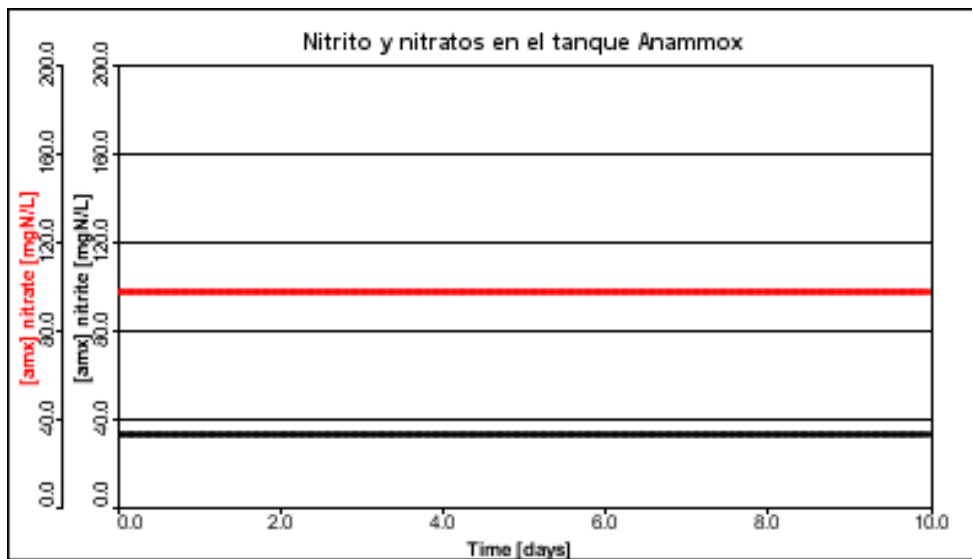


Figura 21. Concentración de nitritos y nitratos en el tanque Anammox, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

Adicionalmente a esto se evalúa la concentración de gas di nitrógeno soluble en el reactor anaerobio, ya que nos da una aproximación a la cantidad de nitrógeno gaseoso que se produce por la oxidación de los nitritos, donde la concentración arroja un valor de 154.7 mg/l en el tanque anammox como se muestra en la figura 22.

Oxidación anaerobia del amoniaco

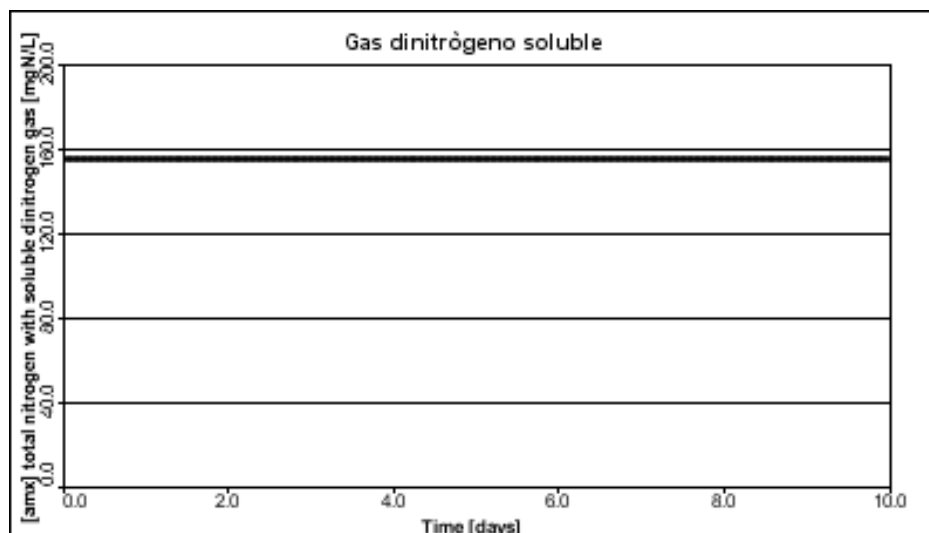


Figura 22. Gas di nitrógeno soluble en el tanque anammox, elaborado por: Autores por medio de GPS-X.

3.2.2.4 Centrifuga.

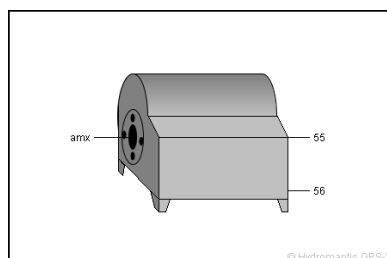


Figura 23. Pantalla múltiple, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

Tabla 14.

Resultado de las concentraciones obtenidas dentro del tambor de pantallas múltiples

Resultados de simulación				
		Amx	55	56
Flow	m3/d	39.29	38.50	0.79
TSS	mg/L	2362.36	720.15	82830.93
COD	mg/L	133.22	55.03	3964.54
Ammonia N	mgN/L	0.28	0.28	0.28
Soluble PO4-P	mgP/L	554.89	554.89	554.89

Oxidación anaerobia del amoniac

TP	mgP/L	557.35	555.88	629.25
Total Alkalinity	mgCaCO ₃ /L	305.68	305.68	305.68
pH	-	6.64	6.64	6.64
DO	mgO ₂ /L	0.01	0.01	0.01

Elaborado por: Autores

La tabla 14 presenta los resultados de la concentración de los constituyentes dentro del tambor de pantallas difusas, en el cual se separan los lodos de excesos los cuales contienen semilla de anammox con una concentración de 2362.36 mg/L y se redirigen al tanque anaerobio para ser utilizados en el proceso anammox, además el agua saliente se reintegra nuevamente al proceso inicial en el sedimentador primario.

3.2.2.5 Lodos.

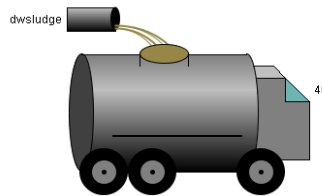


Figura 24. Disposición de lodos, elaborado por: Autores de GPS-X

Tabla 15.

Resultados obtenidos dentro de los lodos de exceso

Resultados de simulación		
		Dwsludge
Flow	m ³ /d	1.50
TSS	mg/L	352722.99
VSS	mg/L	7536.31
cBOD ₅	mg/L	1917.37
COD	mg/L	11202.40
Ammonia N	mgN/L	1033.64

Oxidación anaerobia del amoniaco

Nitrite N	mgN/L	0.00
Nitrate N	mgN/L	0.00
TKN	mgN/L	1793.42
TN	mgN/L	1793.42
Soluble PO4-P	mgP/L	555.36
TP	mgP/L	800.78
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	4338.75
pH	-	7.34
DO	mgO2/L	0.00

Elaborado por: Autores

En la tabla 15 se presenta los resultados de las concentraciones que se disponen dentro de los lodos, los cuales son un subproducto de todo el proceso de tratamiento biológico de las aguas residuales, donde se puede evidenciar una concentración de solidos suspendidos totales de 352722.99 mg/l. entre los cuales se encuentra diferentes tipos de microorganismo a diferentes concentraciones como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16.

Resultados de las concentraciones obtenidas de la Biomasa

Variable	Unit	Value
[amx] ammonia oxidizer biomass	mgCOD/L	0.03656
[amx] nitrite oxidizer biomass	mgCOD/L	4,50E-04
[amx] phosphate accumulating biomass	mgCOD/L	1,79E-03
[amx] fermenting biomass	mgCOD/L	0.0009545
[amx] acetogenic biomass	mgCOD/L	6,58E-03

Oxidación anaerobia del amoníaco

[amx] acetoclastic methanogenic biomass	mgCOD/L	0.002155
[amx] hydrogenotrophic methanogenic biomass	mgCOD/L	0.009264
[amx] methylotrophic biomass	mgCOD/L	1,65E-04
[amx] Anammox biomass	mgCOD/L	39.52

Elaborado por: Autores

3.2.2.6. Efluente.

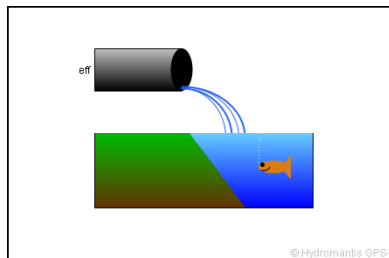


Figura 25. Efluente del sistema, elaborado por: Autores por medio de GPS-X

Tabla 17.

Resultados de las concentraciones obtenidas del efluente del sistema

Resultados de simulación		
		Eff
Flow	m3/d	38878.50
TSS	mg/L	597.08
VSS	mg/L	275.77
cBOD5	mg/L	232.24
COD	mg/L	422.48
Ammonia N	mgN/L	9.72
Nitrite N	mgN/L	0.00

Oxidación anaerobia del amoniacó

Nitrate N	mgN/L	0.01
TKN	mgN/L	38.96
TN	mgN/L	38.97
Soluble PO4-P	mgP/L	13.03
TP	mgP/L	21.78
Total Alkalinity	mgCaCO3/L	229.47
pH	-	7.58
DO	mgO2/L	2.00

Elaborado por: Autores

Una vez realizado el proceso de remoci3n de las concentraciones de contaminantes en el agua cruda (tabla 17) por medio de los procesos planteados de lodos activados y anammox, se evalúa la concentraci3n de nitr3geno amoniacal en el efluente, con una concentraci3n de 9.72 mg-N/L, una concentraci3n de nitritos y nitratos de 0.0001 mg/l y de 0.01 mg/l respectivamente, adem3s de evaluar la concentraci3n de DBO y DQO con el fin de saber cuál es la remoci3n en cuanto a carga orgánica y se obtuvieron concentraciones de 432.24 mg/l y de 422.48 mg/l respectivamente.

3.3. Eficiencia del proceso Anammox

3.3.1. Eficiencia del proceso anammox basados en los resultados del modelo de las condiciones operativas reales de Tunja

Para determinar la eficiencia del proceso anammox se toman las concentraciones obtenidas en el tanque anammox y en el efluente y de esta manera determinar si es viable emplear dicho proceso para el tratamiento de las aguas residuales en la ciudad de Tunja, teniendo en cuenta el dimensionamiento de las estructuras de la PTAR actuales, basados en la siguiente ecuaci3n.

$$Eficiencia (\%) = \frac{C_i - C_s}{C_i} * 100$$

Donde:

Ci= Concentraci3n inicial en el afluente

Oxidación anaerobia del amoníaco

Cs=Concentración saliendo

3.3.1.1 Eficiencia de remoción del amoníaco en el tanque anammox.

$$\varepsilon_{NH_4} = \frac{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l} - 1.82 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}}{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{NH_4} = 91 \%$$

3.3.1.2 Eficiencia de remoción de la DQO.

$$\varepsilon_{DQO} = \frac{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l} - 1.36 \text{ mg} \frac{DQO}{l}}{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DQO} = 99.8 \%$$

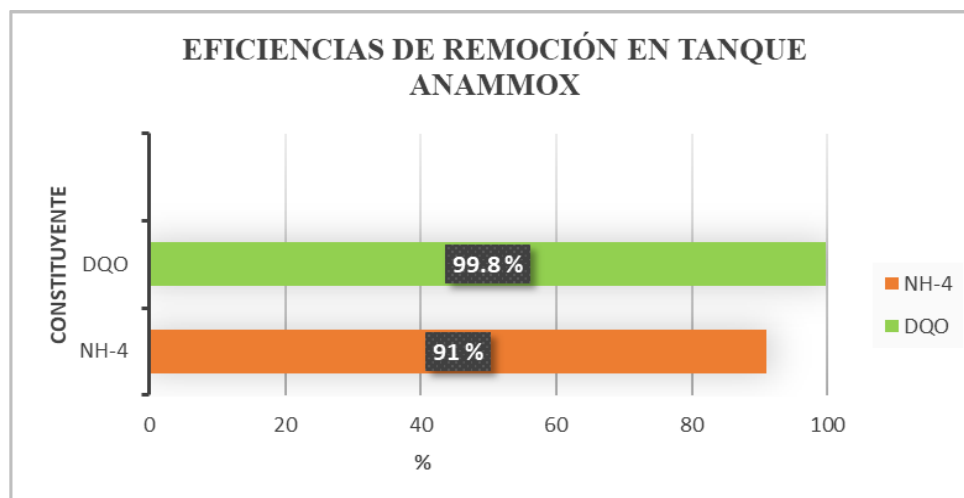


Figura 26. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anammox, elaborado por: Autores

3.3.1.3. Eficiencia de remoción del amoníaco evaluada en el efluente.

Oxidación anaerobia del amoníaco

$$\varepsilon_{NH_4} = \frac{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l} - 21.5 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}}{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{NH_4} = 0 \%$$

3.3.1.4 Eficiencia de remoción de DBO y DQO.

$$\varepsilon_{DQO} = \frac{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l} - 746.8 \text{ mg} \frac{DQO}{l}}{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DQO} = 0.7 \%$$

$$\varepsilon_{DBO} = \frac{537 \text{ mg} \frac{DBO}{l} - 532.5 \text{ mg} \frac{DBO}{l}}{537 \text{ mg} \frac{DBO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DBO} = 0.8 \%$$

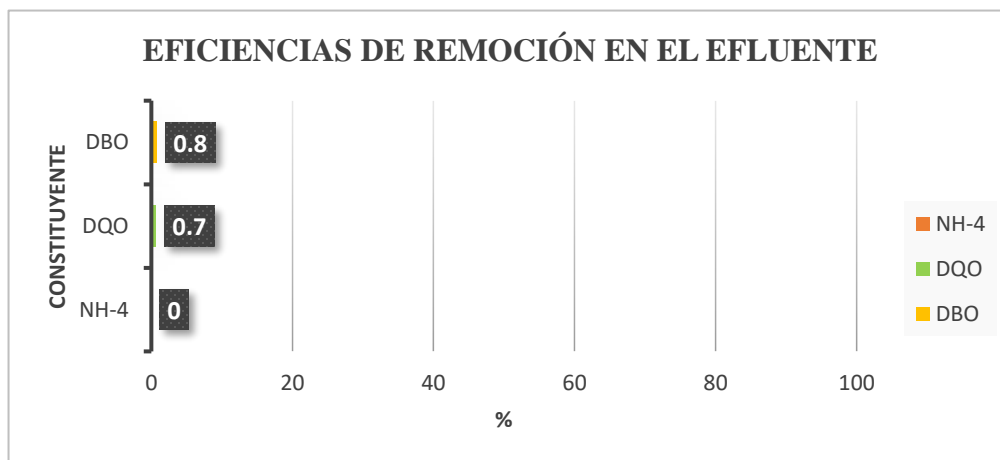


Figura 27. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el efluente, elaborado por:

Autores

3.3.2. Eficiencia del proceso anammox basados en los resultados del modelo con tiempo hidráulico de retención de 9 horas.

Para determinar la eficiencia del proceso de anammox cuando se tiene un tiempo hidráulico de retención de 9 horas, se calcula la eficiencia en el tanque anammox y en el efluente, para así determinar si es viable emplear dicho proceso para el tratamiento de las aguas residuales en la ciudad de Tunja, con un cambio en las dimensiones de las estructuras de cada uno de los procesos.

3.3.2.1 Eficiencia de remoción del amoníaco en el tanque anammox.

$$\varepsilon_{NH_4} = \frac{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l} - 0.28 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}}{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{NH_4} = 98.6 \%$$

3.3.2.2 Eficiencia de remoción de la DBO y DQO.

$$\varepsilon_{DDQO} = \frac{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l} - 1.61 \text{ mg} \frac{DQO}{l}}{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DDQO} = 99.8 \%$$

$$\varepsilon_{DBO} = \frac{537 \text{ mg} \frac{DBO}{l} - 23.63 \text{ mg} \frac{DBO}{l}}{537 \text{ mg} \frac{DBO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DBO} = 95.6 \%$$

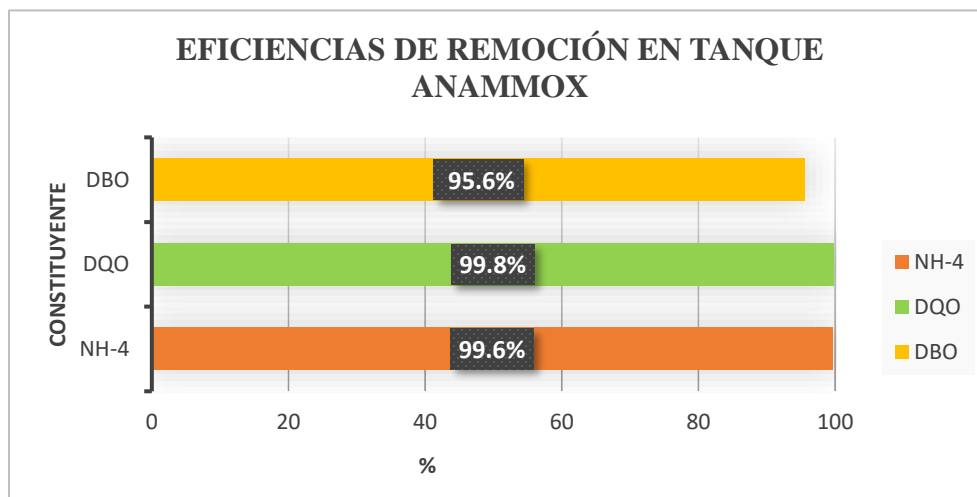


Figura 28. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el tanque anamnox, elaborado por: Autores

3.3.2.3. Eficiencia de remoción del amoníaco evaluada en el efluente.

$$\varepsilon_{NH_4} = \frac{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l} - 9.72 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}}{20 \text{ mg} \frac{NH_4}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{NH_4} = 51,4 \%$$

3.3.2.4 Eficiencia de remoción de la DBO y DQO.

$$\varepsilon_{DQO} = \frac{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l} - 422.48 \text{ mg} \frac{DQO}{l}}{752 \text{ mg} \frac{DQO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DQO} = 43.8 \%$$

$$\varepsilon_{DBO} = \frac{537 \text{ mg} \frac{DBO}{l} - 232.24 \text{ mg} \frac{DBO}{l}}{537 \text{ mg} \frac{DBO}{l}} * 100$$

$$\varepsilon_{DBO} = 56.7 \%$$

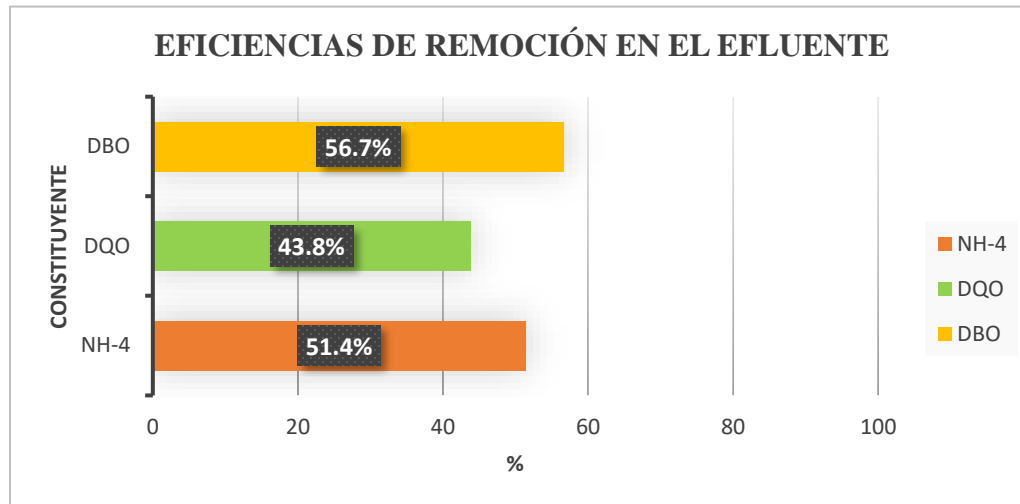


Figura 29. Eficiencias de remoción en los constituyentes en el efluente, elaborado por: Autores

Teniendo en cuenta lo presentado anteriormente se evidencia que el proceso anammox es una alternativa potencialmente viable para implementar dentro del tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Tunja, ya que bajo las condiciones iniciales y una simulación en estado estacionario, el modelo indica una eficiencia de remoción del amoníaco y carga orgánica en el tanque anammox del 91% y 99.8 % respectivamente, para el dimensionamiento planteado que corresponde a las estructuras actuales de la PTAR de Tunja. Así mismo se evaluó la eficiencia bajo un volumen ideal de 14580 m³, del cual se obtuvieron porcentajes de remoción en el tanque anammox del 99.6 % para el amoníaco, de 99.8 % para la remoción de DQO y de 95.6% en la remoción de la DBO, la diferencia radica en que para el volumen de las condiciones reales de la PTAR de Tunja se presenta un tiempo hidráulico de retención de 1768.5 horas para obtener dicha eficiencia, aumentando el tiempo de transformación de los contaminantes, conllevando a un aumento en los costos de operación y mantenimiento, mientras que para el volumen de 14580 m³ se lleva a cabo el proceso dentro de un tiempo hidráulico de retención de 9 horas.

Oxidación anaerobia del amoníaco

Al evaluar la eficiencia de remoción del amoníaco y carga orgánica con respecto al afluente bajo condiciones reales de operación se obtuvieron unas eficiencias de remoción del 0 % para el amoníaco, del 0.7 % para la DQO y del 0.8% para la DBO, indicando que el agua del efluente tiene casi la misma concentración inicial, esto se debe a que el efluente proviene del proceso de lodos activados que trata las aguas del afluente y de la recirculación del agua resultante de la centrifuga, donde este proceso tiene la función de remover la materia orgánica, por lo tanto se infiere que el proceso de lodos activados no tiene la suficiente capacidad de remover dichos contaminantes con el dimensionamiento actual. Por otra parte, con el volumen ideal se obtuvieron eficiencias evaluadas en el efluente del 51.4% para el amoníaco, del 43.8% para la DQO y del 56.7 % para la DBO, indicando que se remueve parcialmente la concentración de dichos contaminantes, debido a que se presenta una mezcla entre el afluente y el caudal de recirculación, es decir que cierta fracción del caudal es vertida sin el tratamiento del anammox.

Conclusiones

La revisión bibliográfica permite identificar que la aplicación del proceso anammox a gran escala, presenta beneficios de optimización y reducción del impacto negativo sobre el medio ambiente, luego de un tiempo determinado para el arranque de la semilla anammox se obtienen porcentajes de eficiencia más elevados en comparación a los procesos convencionales de nitrificación y desnitrificación, así mismo se ve reflejado en la disminución de costos de operación y mantenimiento, convirtiendo la oxidación anaerobia del amoníaco un proceso rentable y sostenible en la aplicación dentro del campo de la ingeniería para el tratamiento de las aguas residuales con alto contenido de nitrógeno amoniacal.

La ciudad de Tunja en su extensión produce aguas residuales domésticas las cuales son vertidas al río “Jordán” para su posterior tratamiento en la planta de aguas residuales de Veolia, donde la caracterización del agua cruda está compuesta por concentraciones de DBO, DQO, nitritos, nitratos, sólidos suspendidos totales, fósforo, coliformes totales, entre otros, los cuales se busca remover por medio de un proceso biológico y a su vez actúan como fuente de carbono y energía para la aplicación del proceso anammox.

Mediante el software de GPS-X se modeló el sistema de tratamiento con el proceso anammox, donde las variables que alimentan el modelo corresponden a las condiciones y concentraciones de los constituyentes del agua cruda de la ciudad de Tunja, con un esquema que comprende un tratamiento inicial de lodos activados y posteriormente el proceso anammox, para ello se realizó una simulación con el caudal y volumen con el que opera actualmente la PTAR de Tunja, donde se tiene un tiempo hidráulico de retención de 1768.5 horas con una eficiencia de remoción de 99.8% del nitrógeno amoniacal en el tanque anammox y para un tiempo de retención de 9 horas con un volumen de 14580 m³ en estado estacionario se obtuvo una eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal y DBO en el reactor anammox de 98.6% y 95.6% respectivamente.

A partir de la revisión bibliográfica y el planteamiento del modelo del proceso anammox, se puede evidenciar que esta tecnología a pesar de ser relativamente nueva, ofrece una alternativa

Oxidación anaerobia del amoníaco

viable y sostenible para sustituir los procesos convencionales que se llevan a cabo actualmente en el tratamiento de las aguas residuales, como la nitrificación y desnitrificación, identificando la ventajas de la aplicación de dicha tecnología y su potencial aplicación en plantas de aguas residuales domesticas en las grandes ciudades como se muestra en la siguiente figura.

Item	Unit	Conventional	Pre-treatment, Anaerobic treatment, Anammox	Difference
Energy production (CH ₄)	MW	0	40	40
CO ₂ emission	kton /year	400	6	394
Power consumption	MW	80	41	39
Sludge production	ktonVSS /year	370	270	100

Figura 30. Comparación de los beneficios de la implementación del proceso convencional y Anammox, tomado de: Henze., Mark., Ekama & Brdjanovic, 2008.

La planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Tunja, busca por medio de su proceso de tratamiento remover hasta un 80% la carga contaminante, mientras que el modelo planteado en condiciones ideales presenta eficiencias de alrededor del 51% para la remoción de nitrógeno amoniacal, evidenciando que, si bien el proceso anammox presenta mayores beneficios ambientales y económicos la plata de tiramiento en condiciones operativas tiene una proyección de remoción mucho mayor.

El desarrollo e implementación de softwares ha sido de gran importancia en el área de la ingeniería, ya que permite conocer cuál será el comportamiento de determinado escenario a diferentes condiciones, GPS-X es una herramienta que ayuda a la toma de decisiones frente a la aplicabilidad de diferentes procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales con el análisis de diferentes variables de estado.

Recomendaciones

Una vez planteado el esquema del proceso anammox se recomienda tener un control de las variables de estado que influyen en el correcto funcionamiento del proceso dentro del reactor anaerobio, como lo es la temperatura, pH, Conductividad, Concentración de oxígeno disuelto, nutrientes, entre otras y de esta manera optimizar el proceso para la remoción del nitrógeno amoniacal. Además de tener un adecuado tratamiento y disposición de los lodos producto del proceso, ya que estos se convierten en un pasivo ambiental. Por otra parte, se puede correr el modelo en un estado dinámico y de esta manera observar cual es el comportamiento del amoniac dentro del tanque anammox hasta alcanzar el estado estacionario, modificando las variables de estado y las condiciones iniciales del modelo, para determinar a qué condiciones se logra una mayor eficiencia.

El modelo planteado está diseñado para el correcto funcionamiento y aplicación bajo un tiempo ideal de retención hidráulica de 9 horas, el cual es necesario para que las bacterias anammox realicen la transformación del nitrógeno amoniacal, sin embargo al evaluar el modelo con las condiciones reales se obtienen eficiencias similares dentro del tanque anammox, pero estas eficiencias disminuyen cuando se evalúan las condiciones operativas reales en el efluente, por lo tanto si se desea implementar el proceso anammox dentro del tratamiento es necesario un redimensionamiento de las estructuras para que se presenten mayores eficiencias de remoción.

Por lo tanto, si se pretende implementar el proceso anammox dentro del sistema de tratamiento del agua residual de la ciudad de Tunja, es necesario realizar un estudio de factibilidad que determine la viabilidad de implementar el proceso anammox en el tren de tratamiento, teniendo en cuenta que para obtener una eficiencia adecuada en la remoción del nitrógeno amoniacal, se debe hacer un redimensionamiento de las estructuras con las que cuenta la PTAR actualmente, lo que se representa en mayores costos de inversión, a pesar de que esta tecnología presenta mayores beneficios en cuanto a la reducción del amonio, costos operativos, costos de mantenimiento, menor producción de subproductos como los lodos provenientes del tratamiento, gas metano y CO₂.

Referencias

- Bilge, A. K., Dityapak, D., Semerci, N., Keklik, E., & Alper Akarsubası. (2018). Anammox start-up strategies: The use of local mixed activated sludge seed versus anammox seed. *Water Science and Technology*, 78(9), 1901-1915. doi: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2018.431>
- Contreras, Y & Garcia, M, (2005). *Gestión del agua, planta de tratamiento de agua residuales-Tunja*. Recuperado de: https://iuc.eu/fileadmin/user_upload/Regions/iuc_lac/user_upload/ESP_Tunja_-_Planta_de_tratamiento_de_aguas_residuales-PTAR.pdf
- García, O. N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos conciencia*, 1(1), 51-58. Recuperado de: http://dci.uagro.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf
- Gerardi, M. H. (2003). *Nitrification and denitrification in the activated sludge process*. John Wiley & Sons.
- GRAF. (2018) *Sustainable Solutions for Water Management*. Recuperado de: <https://www.grafiberica.com/>
- Henze, M., Mark, C., Ekama, G & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment Principles, Modelling and Design*
- Knowles, R. (1982). Denitrification. *Microbiological reviews*, 46(1), 43-70. Recuperado de: <https://journals.asm.org/doi/pdf/10.1128/mr.46.1.43-70.1982>
- Krakat, N., Demirel, B., Anjum, R., & Dietz, D. (2017). Methods of ammonia removal in anaerobic digestion: a review. *Water Science and Technology*, 76(8), 1925-1938. recuperado de: <https://doi.org/10.2166/wst.2017.406>
- Kuenen, J. (2008). Anammox bacteria: from discovery to application. *Nat Rev Microbiol* 6,320–326. Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/nrmicro1857>
- Kun, E., & Kearney, E. B. (1974). Ammonia. In *Methods of enzymatic analysis* (pp. 1802-1806). Academic Press. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-091304-6.50031-8>
- Mulder, A., Van de Graaf, A. A., Robertson, L. A., & Kuenen, J. G. (1995). *Anaerobic*

Oxidación anaerobia del amoníaco

- ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *FEMS microbiology ecology*, 16(3), 177-183. Recuperado de: <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1995.tb00281.x>
- Natural Human Genome research institute. Bacteria. Recuperado en: 20 de septiembre, <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Bacteria>
- Peng, Y., Zhu, G. (2006). Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway. *Appl Microbiol Biotechnol* 73, 15–26. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s00253-006-0534-z>.
- Prihandrijanti, M., & Firdayati, M. (2011). Current situation and considerations of domestic wastewater treatment systems for big cities in Indonesia (Case study: Surabaya and Bandung). *Journal of Water sustainability*, 1(2) 97-104. Recuperado de: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1056.1878&rep=rep1&type=pdf>
- READCIVIL (2019). *Main Terms and Definitions in Waste Water Engineering*. Recuperado de: <https://readcivil.com/main-terms-and-definitions-in-waste-water-engineering/>
- ROJAS, M., JAIMES, L & VALENCIA, M. (2017). Effectiveness, efficacy and efficiency in teamworks. Vol 39. Recuperado de: <https://www.revistaespacios.com/a18v39n06/a18v39n06p11.pdf>
- Salazar, B. (2017). Proceso industrial. Recuperado de: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/procesos-industriales/que-es-un-proceso-industrial/>
- Sanabria, J., Bedoya, L., Sánchez, J. (2009). *PROCESO ANAMMOX UNA APLICACIÓN EN INGENIERÍA: REVISIÓN GENERAL DE LOS ASPECTOS MICROBIANOS*. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (8), 83-92. [Fecha de Consulta 17 de Septiembre de 2021]. ISSN: 1692-9918. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116390010>
- Schmidt, I., Sliemers, O., Schmid, M., Bock, E., Fuerst, J., Kuenen, J. G., ... & Strous, M. (2003). New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater. *FEMS microbiology reviews*, 27(4), 481-492. Recuperado

Oxidación anaerobia del amoníaco

de:[https://doi.org/10.1016/S0168-6445\(03\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0168-6445(03)00039-1)

Schmidt, I., Sliemers, O., Schmid, M., Cirpus, I., Strous, M., Bock, E., ... & Jetten, M. S. (2002). Aerobic and anaerobic ammonia oxidizing bacteria—competitors or natural partners?. *FEMS microbiology ecology*, 39(3), 175-181. recuperado de:<https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2002.tb00920.x>

Speth, D., in 't Zandt, M., Guerrero-Cruz, S. et al (2016). Genome-based microbial ecology of anammox granules in a full-scale wastewater treatment system. *Nat Commun* 7, 11172. Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/ncomms11172>

Stauffer, B & Spuhler, D. (2020). *Anammox*. Recuperado de: <https://sswm.info/es/water-nutrient-cycle/wastewater-treatment/hardwares/semi-centralised-wastewater-treatments/anammox>

Strous, M., Gerven, E., Ping, J. Gijs, K., & Jetten, M. (1997): Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (Anammox) process in different reactor configurations, *Water Research*, Volume 31, Pages 1955-1962, ISSN 0043-1354. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00055-9).

The Indian Nitrogen Assessment. (2017). *Nitrification - Treatment and reuse of wastewater*.

van Kessel, M., Speth, D., Albertsen, M. et al. (2015). Complete nitrification by a single microorganism. *Nature* **528**, 555–559. Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/nature16459>

Varela, G., & Grotiuz, G. (2008). Fisiología y metabolismo bacteriano. *Uruguay, Editorial Cefa*, 43-58. Recuperado de: <https://acortar.link/dgQmzD>

Wei, Y., Jin, Y & Zhang, W. (2020). *Domestic Sewage Treatment Using a One-Stage ANAMMOX Process*. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7246634/#B18-ijerph-17-03284>

Wijaya, I. M. W., & Soedjono, E. S. (2018). Physicochemical characteristic of municipal wastewater in tropical area: case study of Surabaya City, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 135, No. 1, p. 012018). IOP Publishing. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/135/1/012018/meta>

Oxidación anaerobia del amoníaco

Zarza, F. (2019) *Eutrofización - Calidad de Agua*. Recuperado de:
<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-eutrofizacion>