

TRATAMIENTO ANAMMOX EN LINEA PRINCIPAL: EXPERIENCIA PILOTO EN LA EDAR DE JUMILLA

AUTORES: Alicia Gómez, Ingeniero Dpto. IDi CADAGUA S.A.; Francisco Javier Arrieta, Jefe Dpto. IDi CADAGUA S.A.; Francisco del Molino, Director Dpto. IDi CADAGUA S.A.; Luis Larrea, Dr. Ingeniero Consultor CEIT-IK4; Julian Escudero, Jefe de Planta EDAR Jumilla (CADAGUA S.A.); Pedro Simón, Director Técnico Entidad Regional de Saneamiento y depuración de aguas residuales de la Región de Murcia (ESAMUR) y Carlos Lardín, Técnico Explotación Zona II Entidad Regional de Saneamiento y depuración de aguas residuales de la Región de Murcia (ESAMUR).

PALABRAS CLAVE: Anammox, Línea Principal, Aguas Residuales, Nutrientes, Nitrógeno, Nitrificación Parcial, Eliminación Autótrofa de Nitrógeno, MBBR,

KEYWORDS: Anammox, Mainstream, Wastewater Treatment, Nutrients, Nitrogen, Partial Nitrification, Autotrophic Nitrogen Removal, MBBR

RESUMEN

Cadagua en colaboración con la Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia (ESAMUR) y el Centro Tecnológico CEIT-IK4, hemos llevado a cabo un proyecto de investigación en la EDAR de Jumilla (Murcia) para determinar la viabilidad técnica del proceso de Nitrificación Parcial-Anammox en línea principal de la depuradora. Durante un periodo de 12 meses se ha construido y operado una planta piloto que combina la tecnología MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) para la Nitrificación Parcial (NP) y la biomasa granular para el proceso Anammox. Durante la fase de crecimiento de la biomasa específica para cada proceso, se operaron ambos reactores de forma independiente con efluente de la depuradora dopado con las concentraciones adecuadas de nitrógeno amoniacal y nitritos. En la fase final, una vez controlados ambos procesos de forma independiente, se procedió a operarlos en serie. Durante las fases de máxima estabilidad del proceso la eliminación total de nitrógeno se mantuvo en el entorno a $0,100 \text{ kg N (m}^3 \text{ d)}^{-1}$. La supresión de la biomasa oxidadora del Nitrito (NOB) se logró en todo el rango de temperaturas ensayado gracias a la acción de la biopelícula y al control del oxígeno disuelto. De cara a su implementación a escala real se requerirá profundizar en la estabilidad y el control del proceso y en el efecto de los posibles pretratamientos para la eliminación previa de materia carbonosa. En este artículo exponemos la metodología aplicada, los resultados obtenidos y las principales conclusiones de este prometedor proceso.

SUMMARY

Cadagua in collaboration with the Entity of Sanitation and Wastewater Treatment of the Region of Murcia ESAMUR and the Technological Center CEIT-IK4, has carried out a research project in the WWTP of Jumilla (Murcia) to determine the technical feasibility of the Partial Nitrification-Anammox process in the mainstream of the treatment plant. Over a 12-month period, a pilot plant combining MBBR technology for Partial Nitrification (PN) and granular biomass for the Anammox process has been built and operated. During the biomass growth phase specific for each process, both reactors were operated independently with sewage effluent doped with the required concentrations of ammonia nitrogen and nitrites. In the final phase, once both processes were independently controlled, they were operated in series. During the maximum stability phases of the process, the total nitrogen removal was $0,100 \text{ kg N (m}^3 \text{ d)}^{-1}$.

The suppression of the Nitrite Oxidizing Bacteria (NOB) was achieved in the entire range of temperatures tested thanks to the action of the biofilm and the control of dissolved oxygen. Before a final implementation at full scale, it will be necessary to delve into the process control and stability and the selection and effect of possible pre-treatments for the previous removal of carbonaceous matter. In this article we present the applied methodology, the results obtained and the main conclusions of this promising process.

1.- INTRODUCCIÓN

El objetivo de este Proyecto ha sido investigar la viabilidad técnica de eliminar el nitrógeno amoniacal de las aguas residuales aplicando el proceso de Oxidación Anaerobia del Amonio (deamonificación) en línea principal. El proceso convencional para la eliminación del nitrógeno consiste en la acción combinada de biomasa nitrificante (quimiolitoautótrofos) y desnitrificante (heterótrofos). Este proceso conlleva elevados consumos de energía en forma de oxígeno, alcalinidad y materia orgánica. A la vez que implica una importante producción de lodos. La alternativa que nos ofrecen las bacterias anaerobias oxidadoras del amonio (Anammox) conlleva un ahorro en las necesidades de oxígeno de hasta un 40 %, no consume materia orgánica y genera una mínima cantidad de lodos. La implementación de esta tecnología permitiría derivar el máximo de materia carbonosa a la producción de biogás, a la vez que reduciría significativamente los costes de aeración, pudiendo alcanzar la neutralidad energética en depuración, incluso la generación neta de energía si se combina con un pretratamiento anaerobio del agua residual. Por otro lado, esta tecnología al no depender de la biomasa heterótrofa desnitrificante es compatible con aguas con ratios DQO:N subóptimos como sería el efluente de una alta carga o de un pretratamiento anaerobio.

El proyecto de investigación se ha llevado a cabo en la EDAR de Jumilla en colaboración con la Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia (ESAMUR) y del Centro Tecnológico CEIT-IK4.

La biomasa anammox requiere para su desarrollo de nitrógeno amoniacal y nitritos en un ratio estequiométrico $N-NO_2^-/N-NH_4^+$ en el entorno a 1,3. Experiencias previas y estudios bibliográficos sugieren que para el tratamiento en línea principal, este proceso previo de Nitritación Parcial (NP) es recomendable realizarlo de forma independiente al proceso de deamonificación. Esto es especialmente cierto cuando se tratan concentraciones bajas de amonio, como ocurre en línea principal. Esta configuración en dos etapas nos aporta varias ventajas; un control más sencillo del oxígeno disuelto en la Nitritación Parcial, el Anammox se mantiene anóxico en todo momento y la DQO que pueda llegar no le afecta al Anammox, entre otras.

Para asegurar la estabilidad y fiabilidad de este proceso nos enfrentamos a varios retos. Pero sin duda el más complejo es maximizar la actividad de Biomasa Oxidadora de Amonio (AOB) y reprimir la proliferación de microorganismos quimioautotróficos Oxidadores de Nitritos (NOB). Las relativamente bajas concentraciones de nitrógeno amoniacal, así como la presencia de oxígeno y de nitritos, son condiciones que, de no controlarse bien, pueden favorecer el desarrollo de las NOB, lo cual acarrearía un exceso de nitratos y una desviación del equilibrio necesario para el correcto metabolismo del posterior proceso Anammox. Para solventar este problema hemos optado por la tecnología de biopelícula en lecho móvil MBBR. La estratificación de la biomasa AOB y la NOB favorece el crecimiento de las primeras y adicionalmente podemos trabajar con concentraciones más elevadas de oxígeno que en un sistema de biomasa en suspensión, lo cual simplifica la operación.

El segundo reto es mantener la actividad anammox a temperaturas subóptimas. Son bacterias anaerobias mesofílicas cuya actividad cae por debajo de 18-20°C. Por ello es importante obtener una concentración elevada de biomasa activa durante la época cálida. Para este proceso hemos optado por aprovechar la tendencia natural de estas bacterias a formar gránulos consistentes y con buenas propiedades de decantación. Para ello se diseñó un proceso de reactor agitado y decantación convencional con recirculación de biomasa. Es un sistema simple de diseño y operación y gracias a las características del fango permite trabajar con concentraciones elevadas de biomasa a bajas temperaturas.

2.- MATERIALES Y METODO

2.1.- Descripción de la Planta Piloto

Para la realización de la investigación se construyó una planta piloto de 600 L/d de capacidad, que dispone de un reactor de nitrificación parcial de 300L de capacidad y un reactor anammox, de la misma capacidad, seguido de un sistema de decantación; siendo los elementos principales que componen la instalación los siguientes:

- Depósito nodriza con sistema de agitación con volumen de 100L
- Sistema de bombeo de alimentación para un caudal nominal de 25 L/h:
 - Bomba peristáltica con variador de frecuencia
 - Rotámetro para medición de caudal
- Reactor de nitrificación parcial, que dispone del siguiente equipamiento y con un volumen de 250L:
 - Sonda de oxígeno disuelto con su controlador correspondiente
 - Agitador de velocidad lenta
 - Sonda de pH con su correspondiente controlador
 - Sistema de aireación
- Depósito intermedio con agitación y un volumen de 100L
- Sistema de bombeo a reactor Anammox:
 - Bomba peristáltica con variador de frecuencia con un caudal nominal de 25 L/h
 - Rotámetro para medición de caudal
- Reactor Anammox, con un volumen de 250 L y con agitación lenta
- Decantador
- Bombeo de recirculación de fangos con un caudal nominal de 25L/h

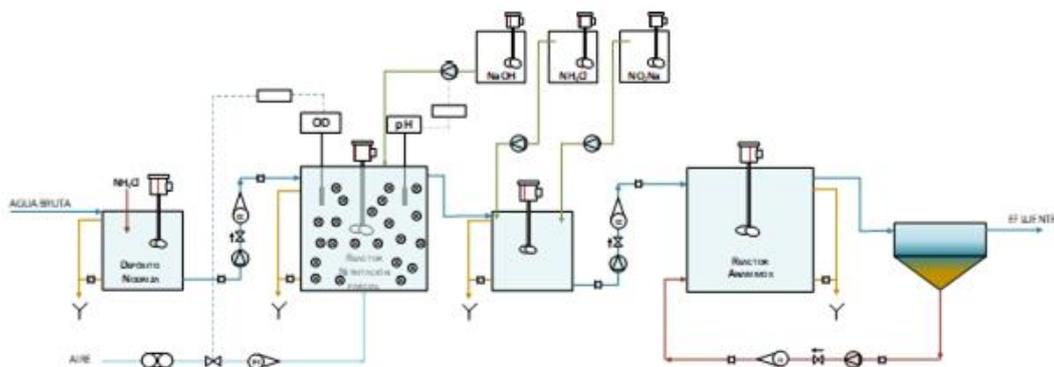


Figura 1. Diagrama de flujos de la instalación



Figura 2. Vista general de la planta piloto

2.2.- Agua de alimentación

El proyecto tenía unas restricciones específicas respecto a las características del agua a tratar, ya que se pretendía demostrar la viabilidad de la aplicación de la tecnología de deamonificación en línea principal de aguas de una EDAR trabajando a temperatura ambiente y con un influente procedente de la salida de un reactor aerobio de alta carga (etapa A) o un pretratamiento anaerobio.

Debido a que en la EDAR de Jumilla no se dispone de ninguno de estos tratamientos, para disponer de agua real de estas características, se decide trabajar con agua sintética a partir de agua del terciario (por su baja DQO) y a la que se añadirán las concentraciones de amonio y nitrato requeridas a lo largo del proceso.

2.3.- Siembra y Puesta en Marcha de los Procesos

La siembra y puesta en marcha de ambos procesos se ha realizado trabajando con ambos reactores de forma independiente.

2.3.1.- Proceso de Nitrificación Parcial:

La puesta en marcha se inicia con una siembra en batch para conseguir que las bacterias nitrificantes colonicen el relleno.

Para ello, se dispone en el reactor, licor mezcla nitrificante de la propia EDAR junto con un 25 % de relleno plástico comercial que tiene una superficie específica $> 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ y se añade amonio a la mezcla hasta lograr una concentración de 200 mg/L de N-NH_4^+ en el reactor.

El valor de control para el oxígeno disuelto ha sido de 1,5 durante esta fase y se dispone el control de pH en valores próximos a 7.3; manteniendo estas condiciones a lo largo de 3-4 días.

Pasado este tiempo de contacto entre el fango activo y los carriers, se vacía el reactor y se comienza la operación en continuo para que la biomasa se vaya adaptando a las características del agua de alimentación y lograr que el biofilm que crezca de forma natural tenga unas características óptimas y sobre todo una estratificación que maximice la presencia de bacterias AOB en las capas superficiales.

La alimentación a la instalación se realiza a través de un depósito de 1 m³ de capacidad al que se añaden los diferentes reactivos necesarios para lograr las concentraciones de nitrógeno, en sus diferentes especies, requeridos en cada momento de la investigación.

2.3.2.- Proceso Anammox:

La propia naturaleza de esta biomasa, de lento metabolismo, la hace difícil de cultivar, por ello la puesta en marcha de esta tecnología se realiza mediante la inoculación del reactor con biomasa anammox activa. Una primera siembra se realiza con una muestra procedente de un reactor de tratamiento de retornos de digestión con tecnología Cleargreen™. Tras varios intentos de activación de los microorganismos, en los que se modifica la forma de operar el reactor pasando de alimentación en continuo a trabajo en batch, no se consiguen rendimientos de eliminación de amonio y nitrito comparables a los que se esperaba obtener, en el caso de que se estuvieran llevando a cabo las reacciones de oxidación anaerobia de amonio correspondientes.

Debido a ello, se procede a realizar una nueva siembra con una biomasa diferente, procedente de un segundo reactor de tratamiento de retornos de digestión con tecnología SBR-NAS® observando, en este caso, y tras mes y medio de operación en batch, consumo de nitrito en el reactor, lo que muestra que se están desarrollando reacciones Anammox en el reactor, aunque el rendimiento sea, de momento, bastante bajo.

2.4.- Seguimiento analítico

Se tomaron muestras líquidas, una vez al día, a la entrada y salida de ambos procesos. La determinación de los parámetros como nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺), nitrógeno como nitrito (N-NO₂⁻) y nitrógeno en su forma nitrato (N-NO₃⁻) se realizó mediante un sistema de análisis comercial a través de cubetas test.

La concentración de biomasa en el reactor anammox se determinó mediante el análisis de sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) que se realizaron de acuerdo con los Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales (APHA, 2005).

3.- RESULTADOS

Una vez inoculado el reactor de nitrificación parcial se procede a alimentar el proceso con una carga de 150 g N-NH₄⁺/m³d adaptando este valor a la evolución del reactor.

Tal y como se recoge ampliamente en la bibliografía, las estrategias empleadas para limitar el crecimiento y la actividad de las bacterias oxidadoras de nitrito están asociadas con la inhibición que producen, entre otros, parámetros tales como la baja concentración de oxígeno disuelto en el líquido, alto o bajo pH, concentración de amoníaco no ionizado (amoníaco libre, NH₃ (FA)), concentración de ácido nitroso no ionizado (ácido nitroso libre, HNO₂ (FNA)) o una combinación de ellos (Park et al., 2015).

Durante el periodo de experimentación de este proyecto se ha trabajado con una combinación de varias de las estrategias indicadas anteriormente, buscando como objetivo final lograr una nitrificación parcial estable que pasa, por un lado por limitar el crecimiento de las bacterias NOB y con ello conseguir una acumulación de nitrato en el reactor y, por otro, obtener un ratio amonio/nitrato en el efluente, adecuado para que esta corriente sirva como alimentación al posterior proceso de oxidación anaerobia de amonio.

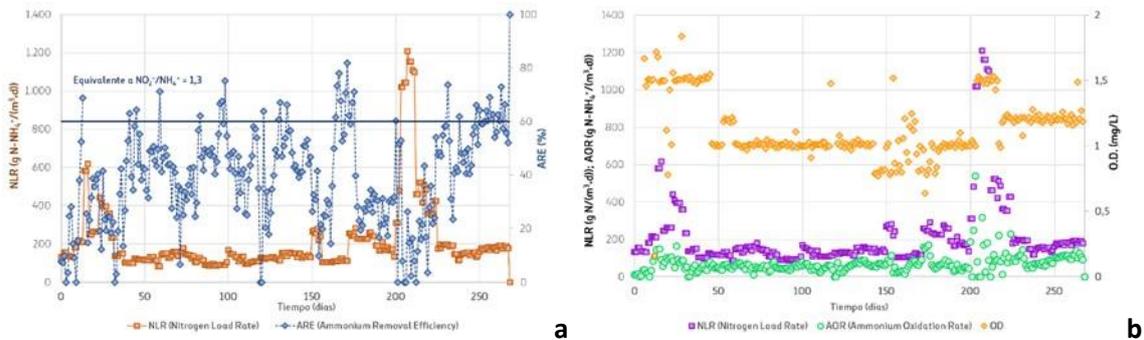


Figura 3.- Evolución del nitrógeno amoniacal (a) y concentración de oxígeno disuelto (b)

Los porcentajes de eliminación de amonio (figura 3.a) han estado próximos al 50 % durante todo el proyecto alcanzando los valores óptimos para este parámetro, cercanos al 60 % (equivalente a una ratio nitrato/amonio de 1,3), en la fase final de la experimentación.

La capacidad de nitrificación del reactor es directamente proporcional a la superficie específica de relleno disponible. Durante este proyecto, la capacidad de nitrificación ha sido un factor limitante en el proceso mostrando valores relativamente bajos (relleno con una superficie específica $>500 \text{ m}^2/\text{m}^3$). Cabe indicar que se probaron varios rellenos y que el comportamiento hidráulico de rellenos con mayor superficie específica ($> 850 \text{ m}^2/\text{m}^3$) no ha sido adecuado para el desarrollo del proyecto ya que adolecían de una excesiva flotabilidad y peor mezcla, por lo que no se han podido alcanzar capacidades de nitrificación mayores.

Uno de los parámetros empleados para el control de la reacción de nitrificación es la concentración de oxígeno disuelto en el reactor. En este sentido, la distribución estratificada de las bacterias en el biofilm ha permitido trabajar con concentraciones con valores entre 1 y 1,5 ppm (figura 3.b); siempre buscando un equilibrio entre la eficiencia en la oxidación de amonio y la producción de nitratos en el reactor que presenta concentraciones crecientes cuánto mayor es el oxígeno disuelto en el reactor.

Otro parámetro de operación importante, para la óptima operación de este proceso, es la temperatura, observando que valores del agua influente inferiores a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ generaban una caída en los rendimientos del proceso por lo que, en condiciones de baja temperatura se instala una resistencia de calentamiento que mantiene la temperatura del reactor en valores entre $20\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$.

La ratio de conversión a nitrato ha mostrado mucha variación en función de las condiciones de operación del reactor alcanzando, obteniéndose al final del periodo de experimentación, valores cercanos al 1,3 estequiométrico buscado (figura 4.a). Así mismo, los datos de acumulación en el reactor han estado cercanos al 80 % durante prácticamente todo el periodo de investigación (figura 4.b) lo que nos indica que las estrategias empleadas para evitar el crecimiento de las bacterias NOB han sido efectivas.

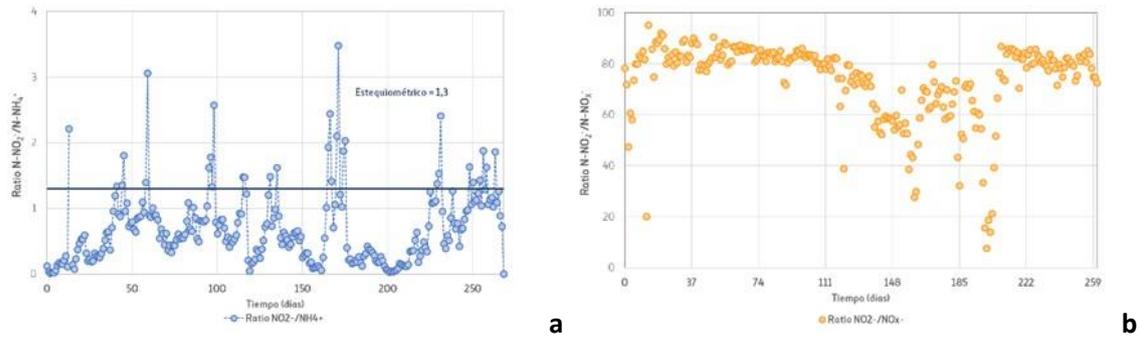


Figura 4.- Ratio de conversión a nitrito (a) y evolución de la acumulación de nitritos en el reactor (b)

El proceso anammox, y debido a que los tiempos de duplicación de esta biomasa son extremadamente bajos y muy dependientes de la temperatura, se opera en condiciones favorables para el crecimiento y activación de estos microorganismos. Se inicia la alimentación en valores de 65-70 g/m³d de nitrógeno y se va incrementando hasta llegar a valores de 200-250 g N/m³d (figura 5.a), alcanzando valores de eliminación de nitrógeno total cercanos al 60 % (figura 5.b). La temperatura en este reactor se ha mantenido en valores entre 20-30 °C a lo largo de todo el período experimental.

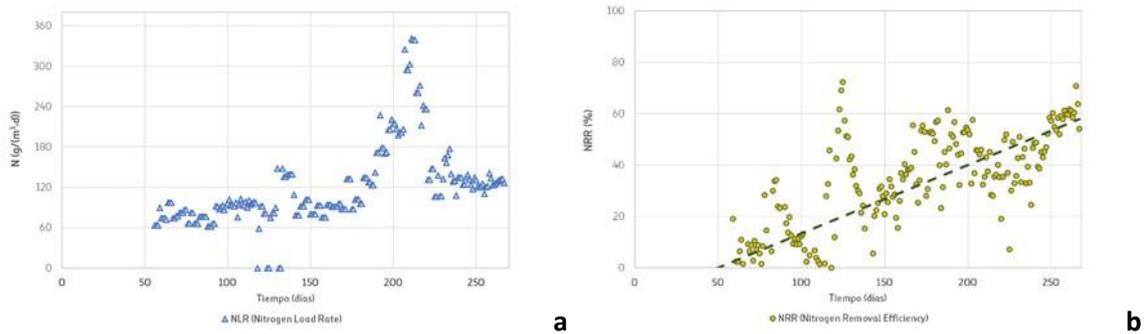


Figura 5.- Evolución de la carga de nitrógeno alimentada (a) y el rendimiento de eliminación conseguidos (b) a lo largo del periodo de investigación en el reactor anammox

Tal y como se puede observar en la figura 6, al inicio de la investigación, el consumo de nitrito era muy bajo frente al de amonio debido, probablemente, a la oxidación aeróbica de este compuesto. Según se avanza en el proyecto, se va revertiendo esta situación acercándose a ratios de consumo nitrito/amonio próximos a valores estequiométricos (1,3).

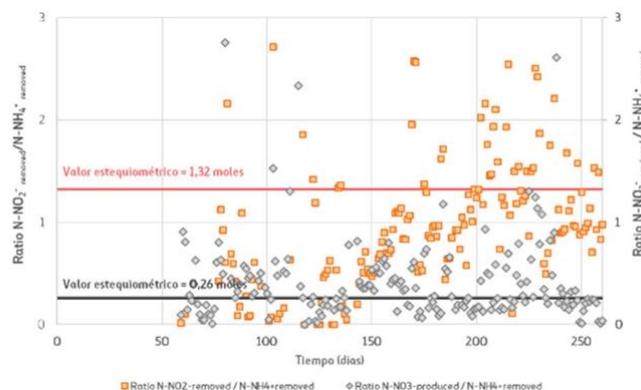


Figura 6.- Evolución el reactor anammox a lo largo del período de investigación

Finalmente, cabe destacar que la experimentación se ha llevado a cabo trabajando tanto con los reactores de forma independiente (fase de puesta en marcha) como acoplados (en serie) de tal manera que mientras la nitrificación parcial ha trabajado durante todo el proceso con agua sintética, preparada a tal efecto con las concentraciones de amonio requeridas en cada fase del proyecto, el proceso anammox lo ha hecho con agua sintética y con agua real obtenida como efluente del proceso de nitrificación parcial. Cabe destacar que este último proceso ha demostrado una buena adaptación de su biomasa a las diferentes condiciones de trabajo.

En la figura 7 se muestra la evolución de la carga de nitrógeno en el proceso global de deamonificación, a lo largo de una de las fases de trabajo con los reactores acoplados. Como se puede ver, con cargas promedio de 90 g N/m³d se obtienen rendimientos de eliminación de nitrógeno total próximos al 60 %. Estas cargas son, como es lógico, notablemente inferiores a las habituales en tratamiento de retornos de digestión. Pero esta es precisamente una de las principales dificultades del proceso en línea principal de EDAR; lograr un proceso estable a temperaturas subóptimas con bajas cargas de nitrógeno y controlando el desarrollo de biomasa NOB.

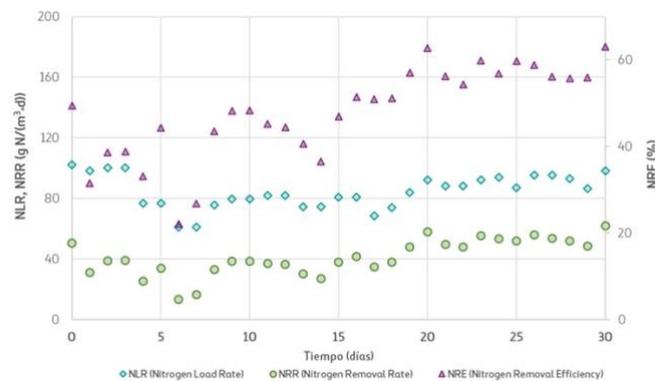


Figura 7.- Evolución de la carga de nitrógeno en el proceso global de deamonificación

4.- CONCLUSIONES

Tras las favorables conclusiones obtenidas en este proyecto, se ha demostrado la viabilidad técnica del empleo de la tecnología de deamonificación propuesta, doble etapa de nitrificación parcial con relleno móvil y anammox granular. Estos resultados tan prometedores han llevado a Cadagua a registrar esta tecnología con el nombre CADAMOX[®] y a acometer, en los próximos meses, nuevas pruebas de concepto que permitan confirmar la tendencia observada en este proyecto y afianzar el control del proceso.

Trabajando en condiciones similares a la línea principal y a temperatura ambiente, se han alcanzado porcentajes de eliminación cercanos al 60 % para el N total y al 75 % para el N amoniacal cuando la carga de alimentación de nitrógeno total es de 90 g N/m³d.

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en el correcto funcionamiento de la instalación, observando una bajada importante en el rendimiento de la instalación cuando la temperatura del agua ha bajado de 15 °C.

El empleo de la concentración de oxígeno disuelto como estrategia para controlar la concentración de NOB en el reactor de nitrificación parcial ha dado resultados satisfactorios, empleando valores entre 1 y 1,5 ppm.

La selección de un relleno plástico adecuado es importante para maximizar la concentración de biopelícula a la vez que se asegura una densidad óptima y una mezcla correcta.

AGRADECIMIENTOS

A la Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia (ESAMUR) y al Centro Tecnológico CEIT-IK4, en especial al Dr. Luis Larrea Urcola.

A las empresas Bioplast Depuración, unFamed Fabricantes S.L. y Acai Depuración S.L. por la cesión de muestras de sus rellenos, necesarios para la realización del presente proyecto.

REFERENCIAS

- A. C. Anthonisen, R. C. Loehr, T. B. S. Prakasam and E. G. Srinath. *Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid*. Water Pollution Control Federation, vol. 48, nº 5, 1976, 835-852
- R. Blackburne, Z. Yuang and J. Keller. *Demonstration of nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater*. Water Research 42, 2008, 2166-2176
- Cao Y, van Loosdrecht MCM, Daigger GT. *Mainstream partial nitritation-anammox in municipal wastewater treatment: status, bottlenecks, and further studies*. Appl Microbiol Biotechnol. 2017;101(4):1365–1383.
- M. Han, H. De Clippeleir, A. Al-Omari, B. wett, S. E. Vlaeminck, C. Bott and S. Murthy. *Impacto of carbon to nitrogen ratio and aeration regime on mainstream deammonification*. Water Science & Technology, 74.2, 2016
- Henze, M., Ekama, G. and Van Loosdrecht, M., 2008. *Biological Wastewater Treatment*. London: IWA Publishing.
- R. Jin, G. Yang, J. Yu and P. Zheng. *The inhibition of the anammox process: a review*. Chemical Engineering journal 197, 2012, 67-79
- J. Y. Jung, S.H. Kang, Y. C. Chung and D. H. Ahn. *Factors affecting the activity of anammox bacteria during start up in the continuous culture reactor*. Water Science & Technology, vol. 55, nº 1-2, pp 459-468
- Laureni M, Falås P, Robin O, et al. *Mainstream partial nitritation and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures*. Water Res. 2016;101:628–639.
- H. Li, S. Zhou, W. Ma, G. Huang and B. Xu. *Fast start-up of anammox reactor: Operational strategy and some characteristics as indicators of reactor performance*. Desalination, 286, 2012, 436-441
- Z. Liang, A. Han, S. Yang, X. Liang, P. Du, G. Liu and Y. Yang. *A control strategy of partial nitritation in a fixed bed biofilm reactor*. Bioresource Technology 102. 2011, 710-715
- S. Park, W. Bae, J. Chung and S. Baek. *Empirical model of the pH dependence of the maximum specific nitrification rate*. Process Biochemistry 42, 2007, 1671-1676
- S. Park, W. Bae and B. Rittmann. *Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH and free ammonia and free nitrous acid inhibition*. Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 335-342
- S. Park, J. Chung, B. E. Rittmann and W. Bae. *Nitrite accumulation from simultaneous free-ammonia and free-nitrous-acid inhibition and oxygen limitation in a continuous-flow biofilm reactor*. Biotechnology and Bioengineering, vol. 112, nº 1, 2015
- Pérez J, Isanta E, Carrera J. *Would a two-stage N-removal be a suitable technology to implement at full scale the use of anammox for sewage treatment?* Water Sci Technol. 2015;72(6):858–864.
- D. Wang, Q. Wang, A. Laloo, Y. Xu, P. Bond and Z. Yuan. *Achieving stable nitritation for mainstream deammonification by combining free nitrous acid-based sludge treatment and oxygen limitation*. www.nature.com/scientificreports. 2016
- Wett B, Omari A, Podmirseg SM, et al. *Going for mainstream deammonification from bench to full scale for maximized resource efficiency*. Water Sci Technol. 2013;68(2):283–289.
- G. Xu, Y. Zhou, Q. Yang, Z. Lee, J. Gu, W. Lay, Y. Cao and Y. Liu. *The challenges of mainstream deammonification process for municipal used water treatment*. Appl Microbiol Biotechnol. 2015