

# Proceso PROGRAMOX®.

## Un proceso estable y controlado para conseguir un efluente con calidad de vertido

# PROGRAMOX® process. A stable, controlled process to achieve an effluent of discharge quality

Oriol Carbó<sup>A,B</sup>, Jaume Teixidó<sup>A</sup>, Marta Campabadal<sup>A</sup>, Joan Canals<sup>A</sup>, Antonio Ordóñez<sup>A</sup>, Sara García<sup>A</sup>, Belén Gutiérrez<sup>A</sup>, Jesús Colprim<sup>B</sup>

<sup>A</sup> GS-Inima Environment S.A.

<sup>B</sup> LEQUIA, Universidad de Girona

## ANTECEDENTES

En el marco del proyecto PRONOX®, GS INIMA desarrolló el know-how necesario para el diseño y control de la tecnología High Rate Activated Sludge (HRAS). PRONOX® permite enviar materia orgánica a la línea de fangos mediante un proceso en el que la biomasa no degrada la materia orgánica, sino que la absorbe y permite que ésta sea derivada en mayor medida y junto con el nitrógeno directamente a la Digestión Anaeróbica de la línea de fangos. Este proceso se realiza con mínimo consumo de energía, sin uso de reactivos químicos, y con un incremento de la producción de biogás respecto a un tratamiento primario convencional y una reducción del consumo energético del tratamiento biológico en la etapa siguiente. Pero el proceso HRAS-PRONOX, no es suficiente por sí mismo para alcanzar una calidad de agua de salida que cumpla con los límites normativos, sino que ha de pasar por otros procesos, entre los que se incluye el proceso de lodos activos.

Como continuación al proceso PRONOX®, se desarrolla el proyecto GRANULAR (PNAGS®), en el que se estudia una nueva etapa de tratamiento como sustituta del proceso de lodos activos convencional que permitiera redireccionar el máximo de carbono a la línea de fangos cumpliendo con los requisitos de eliminación de nutrientes en el agua tratada.

Para lograr la eliminación autótrofa de nitrógeno en la corriente principal, el proceso en dos etapas parece ser la opción más prometedora. Una primera etapa donde se consiga una nitrificación parcial con una relación nitrito/amoniaco adecuada (cerca a 1,32 N-NO<sub>2</sub>-:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) al tiempo que se elimina la materia orgánica biodegradable, y una segunda etapa centrada en la desamonificación anaerobia autótrofa (proceso Anammox).

## BACKGROUND

GS INIMA developed the know-how needed for the design and control of High-Rate Activated Sludge (HRAS) technology within the framework of the PRONOX® project. PRONOX® enables organic matter to be sent to the sludge line by means of a process in which the biomass absorbs rather than degrades the organic matter and allows it a greater quantity of it to be sent, together with the nitrogen, directly to the Anaerobic Digestion of the sludge line. This process, in which energy consumption is minimal and no chemical reagents are required, enables higher biogas production than conventional primary treatment and reduces energy consumption in the following stage of biological treatment. However, the HRAS-PRONOX process is insufficient in itself to achieve output water of a quality compliant with regulatory limits. Other processes, including the activated sludge process, also have to be undergone.

The GRANULAR (PNAGS®) project was developed as a continuation of the PRONOX® process and entailed the study of a new treatment stage to replace the conventional activated sludge process, a stage that would enable the maximum amount of carbon to be redirected to the sludge line whilst complying with nutrient removal requirements for the treated water.

A two-stage process appears to be the most promising option to achieve autotrophic nitrogen removal in the main flow: A first stage where partial nitrification is achieved with a suitable nitrite/ammonia ratio (close to 1.32 N-NO<sub>2</sub>-:N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) and biodegradable organic matter is also removed, and a second stage focusing on autotrophic anaerobic deammonification (Anammox process).

GS INIMA, together with the Universidad de Girona (UdG), has developed the PROGRAMOX® process, which combines the three above-mentioned processes.

De esta forma GS INIMA, junto con la Universidad de Girona (UdG) ha desarrollado el proceso PROGRAMOX® que combina los tres procesos mencionados: un proceso de fangos activos de alta carga (PRONOX®) como primera etapa, seguida de la eliminación de nitrógeno en dos etapas mediante un reactor granular aerobio de nitrificación parcial (PNAGS®), finalizando con una deammonificación anaerobia autotrófica (ANAMMOX). De esta forma, se pretende maximizar la producción de biogás de las EDAR y minimizar el consumo energético en la aireación del proceso biológico

### PROCESO PROGRAMOX®

En una depuradora de aguas residuales urbanas lo más habitual es que el agua pretratada pase por decantación primaria y a continuación se someta a un tratamiento de fangos activados convencional (CAS). Las purgas de la decantación primaria y secundaria pueden ir a una digestión anaerobia, donde se producirá biogás que servirá, o bien para producir energía, o bien para el calentamiento de la propia digestión. Con la producción de energía derivada de la producción del biogás de digestión, se puede llegar a recuperar un 30% de la energía consumida en el proceso de depuración (Tchobanoglous et al., 2014) (figura 1).

En el proceso PROGRAMOX® (figura 2), HRAS+ PNAGS®+Anammox, el efluente del proceso PRONOX® (lodos de alta carga de primera etapa o HRAS) pasa a una segunda etapa en la que se consigue la nitrificación parcial y la reducción de materia orgánica y sólidos necesarios para el correcto funcionamiento de la siguiente etapa. El efluente de este último pasa a un reactor de forma compacta con bajo consumo energético, para la eliminación anaerobia y autótrofa del nitrógeno por biomasa anammox.

Con PROGRAMOX®, se incrementa la producción de biogás y, en consecuencia, la producción de ener-

es: a first stage featuring a high-rate activated sludge process (PRONOX®), followed by nitrogen removal in two stages by means of a partial nitrification aerobic granular reactor (PNAGS®), and finally, an autotrophic anaerobic deammonification (ANAMMOX) stage. The aim is to maximise biogas production at the WWTP and minimise energy consumption in the aeration of the biological process.

### PROGRAMOX® PROCESS

In an urban wastewater treatment plant, pretreated water usually undergoes primary settling followed by conventional activated sludge treatment (CAS). The purges from primary and secondary settling can be sent to anaerobic digestion, where biogas is produced, either for energy production or to heat the digestion process itself. The energy from digestate biogas production enables up to 30% of the energy consumed in the treatment process to be recovered (Tchobanoglous et al., 2014) (Figure 1).

In the PROGRAMOX® process (Figure 2), HRAS + PNAGS® + Anammox, the effluent from the PRONOX® process (first stage high-rate activated sludge or HRAS) passes to a second stage in which partial nitrification is achieved along with the reduction of organic matter and solids necessary for the correct operation of the following stage. The effluent from the second stage is sent to a compact reactor with low energy consumption for anaerobic and autotrophic nitrogen removal by anammox biomass.

With PROGRAMOX®, biogas production and, consequently, electricity production is increased, while at the same time ensuring optimal output water quality for discharge. (Carbó et al., 2024).

The main stages of the PROGRAMOX® PROCESS are described below.

### PRONOX®

The redirection of organic carbon to energy production is carried out by means of a High-Rate Activated

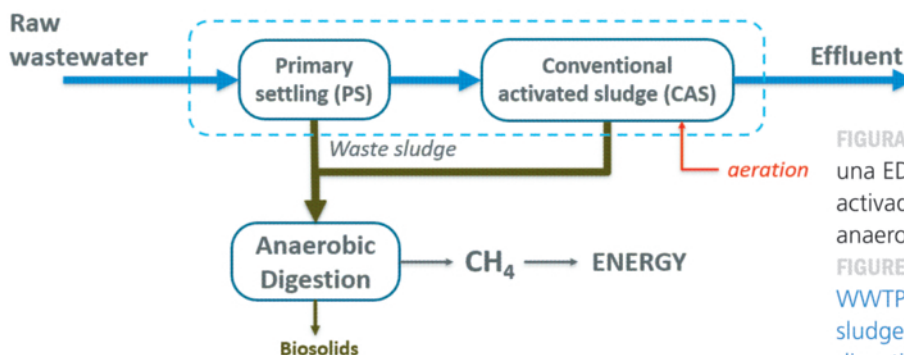


FIGURA 1. Esquema de depuración de una EDAR con tratamiento de fangos activados convencional y digestión anaerobia

FIGURE 1. Schematic diagram of a WWTP with conventional activated sludge treatment and anaerobic digestion

➤ **High energy consumption**

➤ **Only 30% self-sufficiency**

gía eléctrica, a la vez que se asegura una calidad del agua de salida óptima para su vertido. (Carbó et al., 2024).

Las etapas principales del PROCESO PROGRAMOX se describen a continuación.

### PRONOX®

La redirección del carbono orgánico hacia la producción de energía se realiza mediante un proceso de fangos activados de alta carga (High-Rate Activated Sludge, HRAS). La reducción del contenido en carbono orgánico del agua residual básicamente se consigue mediante procesos de biosorción. En ellos, el carbono orgánico inicialmente presente en el agua residual sufre una transformación, siendo recuperado con la matriz de fango biológico en la corriente de purga del reactor. Posteriormente, este fango biológico se enviaría a digestión anaerobia para maximizar la producción de biogás.

El proceso PRONOX funciona como el equivalente de un tratamiento primario. Su principal característica es la mayor cantidad de materia orgánica y nitrógeno redireccionados a digestión anaerobia que un tratamiento primario convencional. Esto da lugar a un mayor aporte de materia susceptible a ser convertida en biogás en digestión, por un lado, y un menor consumo en aireación en el tratamiento secundario (Canals et al., 2023).

Esto se consigue haciendo pasar el agua por un reactor de alta carga, que oxida una cantidad mínima de carbono, favoreciendo en su lugar los procesos de adsorción, biofloculación y almacenamiento de esta materia orgánica (figura 3).

### REACTOR DE BIOMASA GRANULAR (PNAGS®)

La alternativa desarrollada por GS Inima para la Nitrificación-desnitrificación consiste en un proceso de fango granular para la eliminación de la materia orgánica y el nitrógeno mediante nitrificación autotrófica y desnitrificación heterotrófica.

Sludge (HRAS) process. Reducing the organic carbon content of the wastewater is basically achieved by means of biosorption processes, whereby the organic carbon in the wastewater undergoes a transformation and is recovered with the biological sludge matrix in the purge stream of the reactor. This biological sludge is sent to anaerobic digestion to maximise biogas production.

The PRONOX® process functions as the equivalent of primary treatment. The main feature of the process is that a greater amount of organic matter and nitrogen is redirected to anaerobic digestion than with a conventional primary treatment. This results in a higher input of matter susceptible to be converted to biogas in digestion, and also in lower energy consumption for aeration in secondary treatment (Canals et al., 2023).

This is achieved by sending the water through a high-load reactor, which oxidises a minimal amount of carbon and, instead, facilitates the processes of adsorption, biofloculation and storage of this organic matter (Figure 3).

### GRANULAR BIOMASS REACTOR (PNAGS®)

The Nitrification-Denitrification alternative developed by GS Inima consists of a granular sludge process for the removal of organic matter and nitrogen by means of autotrophic nitrification and heterotrophic denitrification.

Aeration can be provided by coarse or fine bubbles. This reactor is operated as a sequential batch reactor (SBR) at constant volume with the particular feature of developing granular biomass for COD and nitrogen removal. The reactor was inoculated at the beginning of the operation with flocculated sludge from a conventional WWTP and granules were obtained as a result (Carbó et al., 2024).

Each operational cycle in the SBR comprises the following phases: 1) simultaneous filling/drawing (F/D), 2) anaerobic reaction, 3) aerobic reaction, and 4) sedimentation (Figure 4). The total duration of the cycles

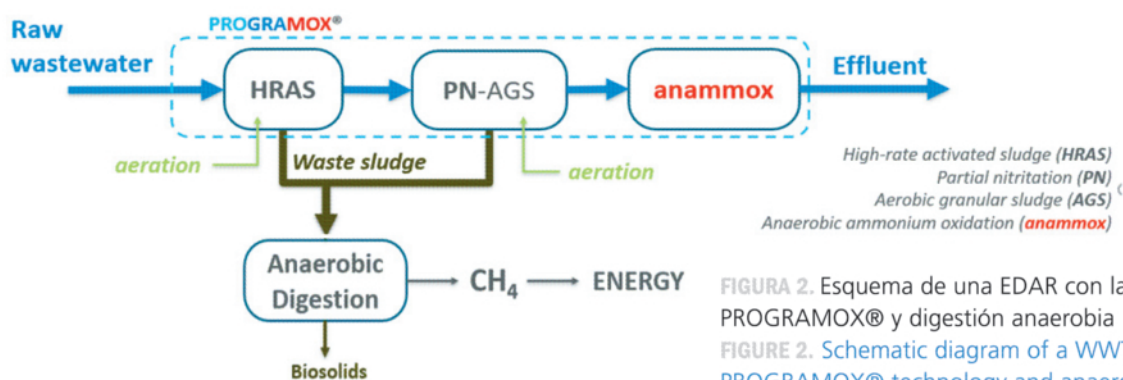


FIGURA 2. Esquema de una EDAR con la tecnología PROGRAMOX® y digestión anaerobia  
FIGURE 2. Schematic diagram of a WWTP with PROGRAMOX® technology and anaerobic digestion

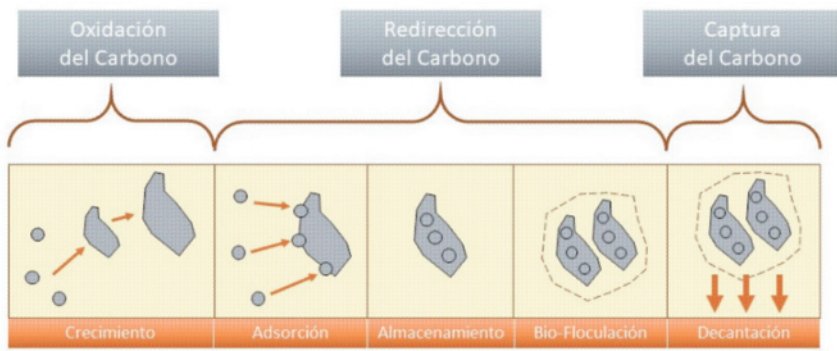


FIGURA 3. Procesos de eliminación de la materia orgánica en una EDAR  
 FIGURE 3. Organic matter removal processes at a WWTP

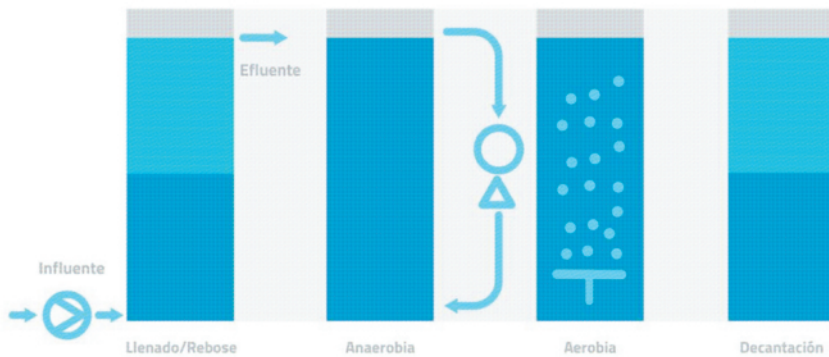


FIGURA 4. Fases de operación del reactor PNAGS®.  
 FIGURE 4. PNAGS® reactor operating stages

La aireación, puede suministrarse mediante burbujas gruesas o finas. Este reactor se opera como un reactor discontinuo secuencial (SBR) a volumen constante con la particularidad de desarrollar biomasa granular para la eliminación de DQO y nitrógeno. El reactor se inoculó al principio de la operación con lodo flocular procedente de una EDAR convencional y a partir de aquí, se obtuvieron gránulos (Carbó et al., 2024).

Cada ciclo operativo en el SBR comprende las siguientes fases: 1) llenado/vaciado simultáneo (F/D), 2) reacción anaeróbica, 3) reacción aeróbica, y 4) sedimentación (Figura 4). La duración total de los ciclos osciló entre 160 y 360 min y la concentración de OD alrededor de 2,0mg/l. La ratio de volumen de intercambio (VER) se ajusta al 50%.

Con este proceso se consigue ahorrar alrededor de un 60% de la energía necesaria para la nitrificación, en comparación con un reactor de lodos activos convencional.

ranged from 160 to 360 min and the DO concentration was around 2.0mg/l. The volume exchange ratio (VER) was set to 50%.

The main objective of this reactor is to achieve partial nitritation (PN), whilst preventing the formation of nitrates.

This process results in energy consumption for nitrification of around 60% less than with a conventional activated sludge reactor.

### ANAMMOX

The Anammox reactor is the alternative for the removal of nitrogen from the wastewater, including return flows. It replaces the usual two-stage process involving aerobic nitrification followed by anoxic denitrification (N/D).

Anammox bacteria do not require COD or O<sub>2</sub> to remove ammonium, but do so using nitrite, in accordance with the following reaction (Strous et al., 1998):

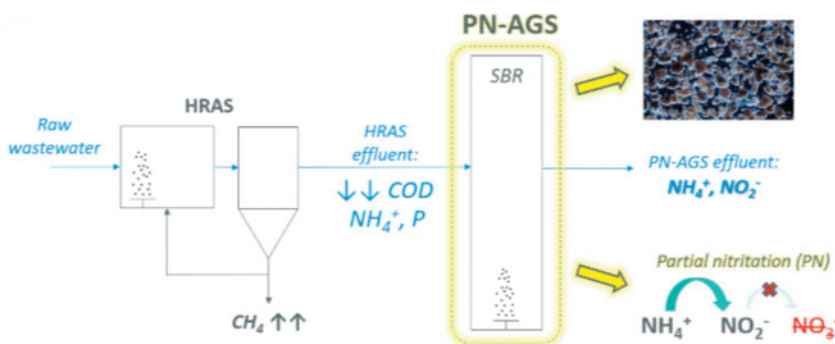


FIGURA 5. Esquema del proceso PRONOX® seguido del reactor PN-AGS  
 FIGURE 5. PRONOX® process in PN-AGS/ PRONOX® reactor



FIGURA 6. Planta piloto PROGRAMOX® en la EDAR La Garriga

FIGURE 6. PROGRAMOX® Pilot Plant at the La Garriga WWTP

El objetivo principal que se persigue en este reactor, es el de conseguir una nitrificación parcial (PN), evitando llegar a formar nitratos.

### ANAMMOX

El reactor Anammox, es la alternativa para la eliminación del nitrógeno del agua residual incluyendo el de los retornos, que sustituye al procedimiento habitual de una primera etapa aerobia de nitrificación y una segunda etapa anóxica de desnitrificación (N/D).

Las bacterias anammox, no necesitan DQO ni  $O_2$  para eliminar amonio, sino que lo hace a partir del nitrito según la siguiente reacción (Strous et al., 1998):

Por ello, a la salida del reactor granular debe haber un equilibrio entre estas dos especies para optimizar el funcionamiento de las bacterias, fijándose la relación  $NO_2^-/NH_4^+$  alrededor de 1,32.

### PLANTA PILOTO

Con la colaboración del Consorci Besòs-Tordera quien ha cedido las instalaciones de la EDAR de la Garriga (Barcelona) y la UdG, GS INIMA ha diseñado y construido una planta piloto para el estudio y desarrollo de la tecnología PROGRAMOX®. La planta piloto que se ha proyectado para el desarrollo de esta tecnología, trata agua pretratada de la EDAR de la Garriga.

La planta, está formada por un reactor y dos decantadores para el proceso PRONOX®, un reactor PNAGS®, y un reactor Anammox. La corriente de fango no se trata, pero si se analiza la capacidad de biometanización que tiene el fango purgado para estudiar el aumento de la producción de biogás en el

For this purpose, there must be an equilibrium between these two species at the outlet of the granular reactor to optimise the functioning of the bacteria, with the  $NO_2^-/NH_4^+$  ratio being set at around 1.32.

### PILOT PLANT

With the collaboration of the Besòs-Tordera Consortium, which provided the facilities of the La Garriga WWTP (Barcelona), and the UdG, GS INIMA designed and built a pilot plant for the study and development of PROGRAMOX® technology. The pilot plant treats pretreated water from the La Garriga WWTP.

The plant consists of a reactor and two settling tanks for the PRONOX® process, a PNAGS® reactor and an Anammox reactor. The sludge stream is not treated, but the biometanisation capacity of the purged sludge is analysed to study the increase in biogas production that would occur were this sludge to undergo anaerobic digestion

The different stages of the pilot plant process are described below (Figure.7):

- First stage: the PRONOX® process, which has an inlet pump (2.5 m<sup>3</sup>/h), 2 biological reactors (2x0.8m<sup>3</sup>), two settling tanks (diameter 1m and 1.4m), a recirculation pump (2m<sup>3</sup>/h), a purge pump (0.5 m<sup>3</sup>/h), an air compressor and different electric valves. The effluent from the PRONOX® stage passes to the PN-AGS® reactor, which is fed from the bottom through perforated pipes.

- Second stage: The AGS reactor has a height of 4.5 m and a diameter of 0.5 m (0.9 m<sup>3</sup>). The effluent overflows from the top of the reactor and passes through a 50-L tank before discharge. Aeration can be provided by either coarse or fine bubbles. This reactor is operat-

supuesto que este fango fuera a digestión anaerobia.

A continuación, se describen las diferentes etapas del proceso de la (planta figura.7):

- Primera etapa: el proceso PRONOX®, que dispone de una bomba de entrada (2,5 m<sup>3</sup>/h), 2 reactores biológicos (2x0,8m<sup>3</sup>), dos tanques de sedimentación (de diámetro 1m y 1,4m), una bomba de recirculación (2m<sup>3</sup>/h), una bomba de purga (0,5 m<sup>3</sup>/h), un compresor de aire y diferentes válvulas eléctricas. El efluente del PRONOX®, pasa al tratamiento PN-AGS®, alimentándose por la parte inferior mediante tubería perforada.

- Segunda etapa: El reactor AGS es un reactor de 4,5 m de altura y 0,5 m de diámetro (0,9 m<sup>3</sup>). El efluente del reactor rebosa por la parte superior y pasa por un depósito de 50 L antes de la descarga. La aireación, puede suministrarse mediante burbujas gruesas o finas. Este reactor se opera como un reactor discontinuo secuencial (SBR) a volumen constante con la particularidad de desarrollar biomasa granular para la eliminación de DQO y PN.

- Tercera etapa: El agua pasa a la unidad anammox, que consiste en un reactor de 330 L que funciona como un reactor continuo agitado con un decantador acoplado. El reactor anammox trata el 90% del caudal total producido en el reactor PN anterior aplicándose una curva de caudal típica de EDAR.

Las variables pH, potencial redox, temperatura, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se monitorizan on-line en el reactor anammox utilizando sondas específicas.

## RESULTADOS

Los principales resultados de este trabajo son:

1. En la primera etapa, en el reactor de alta carga PRONOX® se ha trabajado a un tiempo de retención hidráulica (HRT) de 1h, tiempos de retención celular (SRT) menores de 1 día y baja concentración de O<sub>2</sub> (~0,5 mg OD/d). La concentración media de MLSS, ha estado alrededor de los 2 g/l.

ed as a sequential batch reactor (SBR) at constant volume with the particular feature of developing granular biomass for COD removal and PN.

- Third stage: The water passes to the anammox unit, which consists of a 330-L reactor operating as a continuous stirred reactor to which a settling tank is connected. The anammox reactor treats 90% of the total flow produced in the preceding PN reactor, using a typical WWTP flow curve.

The pH, redox potential, temperature, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> variables are monitored on-line in the anammox reactor using specific probes.

## RESULTS

The main results of this study are as follows:

1. In the first stage, the PRONOX® high-load reactor was implemented with a hydraulic retention time (HRT) of 1h, a solids retention time (SRT) of less than 1 day and a low O<sub>2</sub> concentration (~0.5 mg DO/d). The average MLSS concentration was around 2 g/l.

Under these conditions, a reduction of 50±12% of the total COD input and 19±11% of the soluble COD was achieved (Figure 8).

2. In the PNAGS® reactor, successful aerobic granular formation was achieved by treating real wastewater effluent from a PRONOX® reactor through selective purging of the biomass from the top of the settled sludge bed.

The following graphs (Figure 10) show the results obtained for the removal of solids, nitrogen compounds and COD during the operation of the PNAGS®.

3. The challenge in the third stage was to determine the appropriate control strategy to achieve the optimum NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ratio for feeding the anammox reactor.

From day 32 until the end of the PNAGS® reactor operation, partial oxidation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> to NO<sub>2</sub><sup>-</sup> was achieved by feeding the anammox reactor with a NO<sub>2</sub><sup>-</sup>/

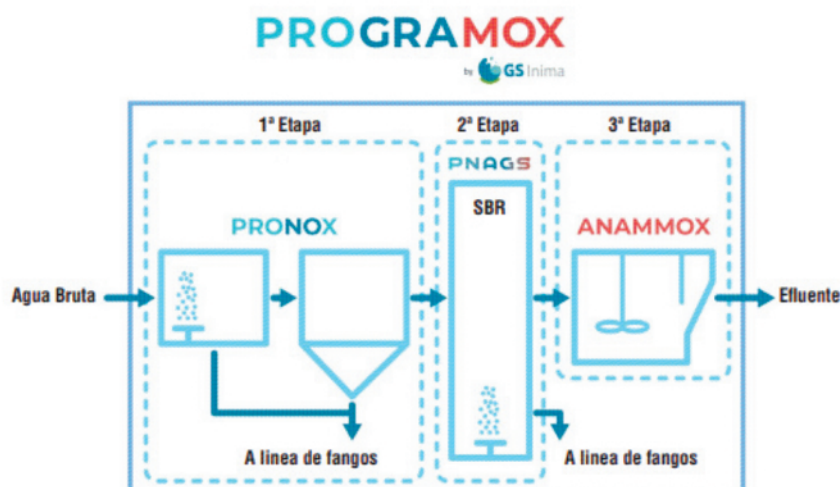


FIGURA 7. Diag rama de la planta piloto PROGRAMOX®  
FIGURE 7. Diagram of PROGRAMOX pilot plant

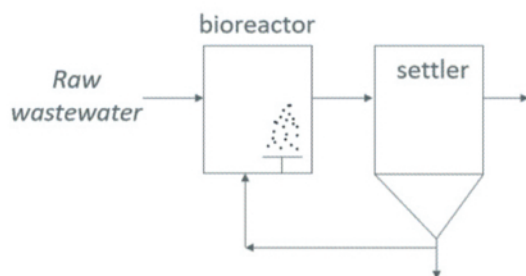
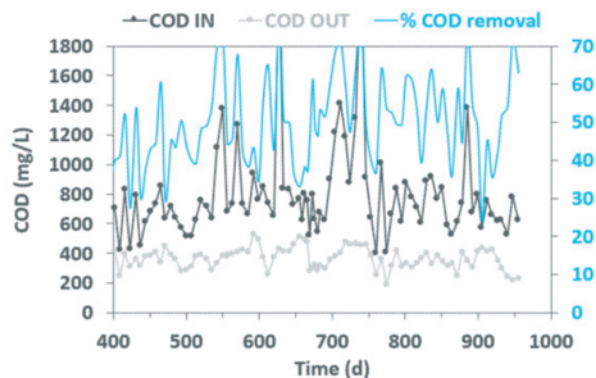


FIGURA 8. Esquema del proceso PRONOX® y gráfico de eliminación de la DQO

FIGURE 8. Diagram of PRONOX® process and COD removal graph



En estas condiciones se ha conseguido una reducción del  $50 \pm 12\%$  de la DQO total de entrada y un  $19 \pm 11\%$  de la DQO soluble (figura 8).

2. En el reactor PNAGS®, se consiguió una formación granular aerobia exitosa tratando agua residual real efluente de un reactor PRONOX® mediante purga selectiva de la biomasa desde la parte superior del lecho de fango decantado.

En los gráficos siguientes (figura 10), se muestran los resultados obtenidos de eliminación de sólidos, compuestos nitrogenados y DQO durante la operación del PNAGS®.

3. El reto en la tercera etapa, ha sido decidir la estrategia de control adecuada para conseguir la relación  $\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+$  óptima de alimentación del reactor anammox.

A partir del día 32 y hasta el final de la operación del reactor PNAGS®, se consiguió la oxidación parcial del  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_2^-$ , alimentando el reactor anammox con una ratio  $\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+$  de  $1.0 \pm 0.5$  g N/g N, consigna idónea para el correcto funcionamiento de las bacterias autotróficas.

Dado que el reactor PN funciona como un reactor discontinuo secuencial (SBR) y el reactor anammox en modo continuo, el efluente PN debe almacenarse brevemente en un tanque tampón antes de alimentar el reactor anammox con un El TRH similar a la duración de un ciclo en el PN-SBR.

$\text{NH}_4^+$  ratio of  $1.0 \pm 0.5$  g N/g N, an ideal set point for the correct functioning of the autotrophic bacteria.

Because the PN reactor operates as a sequential batch reactor (SBR) and the anammox reactor in continuous mode, the PN effluent must be stored briefly in a buffer tank prior to feeding the anammox reactor with a HRT similar to the cycle time in the PN-SBR.

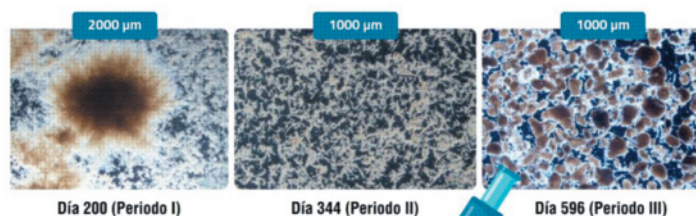
Figure 12 shows the results obtained after two months of operation of the anammox reactor, i.e., the final stage of the PROGRAMOX® process. The correlation between the  $\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+$  ratio at the reactor inlet and the efficiency of the nitrogen removal by the autotrophic bacteria can be seen.

## CONCLUSIONS

During the operation of the pilot plant, it was demonstrated that the first PRONOX® stage enables the maximum quantity of organic matter and nitrogen to be diverted to the sludge line, thus saving energy and increasing biogas production.

In the second PNAGS® stage, the removal of solids and organic matter and partial nitrification achieved was ideal for the completion of nitrogen removal in the anammox stage, with subsequent energy savings associated with aeration.

Figure 13 shows a comparative graph of the energy balance of a conventional WWTP and the HRAS + PN-A system in terms of energy consumption for physical

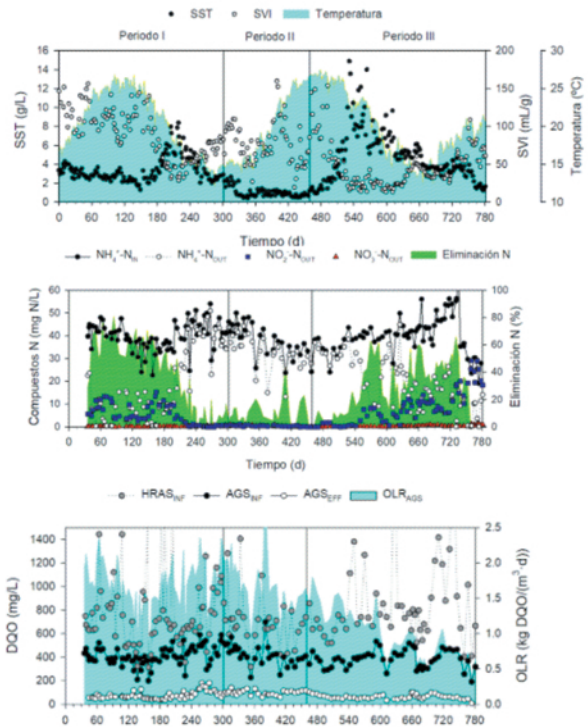


Imágenes de microscopio Estereoscópico de la biomasa

FIGURA 9. Imágenes de microscopio Estereoscópico de la biomasa granular. A: día 200. B: día 344. C: día 596.

FIGURE 9. Stereo microscope images of the granular biomass. A: day 200. B: day 344. C: day 596.

**FIGURA 10.** Superior: TSS, SVI30 y temperatura en el reactor. Medio: Compuestos del N y eficiencia reducción de N en el reactor. Inferior: Concentración DQO influente y efluente de PRONOX® y PNAGS® y cargas de DQO en el reactor PNAGS®.



En la figura 12 se muestran los resultados obtenidos tras dos meses de operación del reactor anammox, siendo esta la última fase del proceso PROGRAMOX®. En éstos, se puede apreciar la correlación del ratio  $\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+$  de entrada al reactor, con la eficiencia de eliminación del nitrógeno por parte de las bacterias autotróficas.

### CONCLUSIONES

Durante la operación de la planta piloto se ha demostrado que primera etapa PRONOX® permite derivar el máximo de materia orgánica y nitrógeno a la línea de fangos ahorrando energía e incrementando la producción de biogás.

En la segunda etapa PNAGS® se ha conseguido la eliminación de sólidos, materia orgánica y una nitrificación parcial idónea para acabar de eliminar el nitrógeno en la etapa anammox, con el subsecuente ahorro energético debido a la aireación.

En la figura 13, se presenta un gráfico comparativo del balance energético de una EDAR convencional y el sistema HRAS + PN-A en términos de consumo energético para procesos físicos, oxidación neta de DQO y N, consumo energético total, energía recuperada en combustión de biogás y el consumo de energía balanceado.

Según los resultados obtenidos, la aplicación de la configuración de la tecnología HRAS + PN-A, implicaría un consumo total de energía un 22,5% menor que en una EDAR convencional. La ratio de energía

processes, net oxidation of COD and N, total energy consumption, energy recovered in biogas combustion and balanced energy consumption.

The results obtained indicate that implementation of the HRAS + PN-A technology configuration would mean total energy consumption of 22.5% lower than in a conventional WWTP. Energy recovered in biogas combustion would be 40% of total energy consumption for the HRAS + PN-A system compared to 17% for a conventional WWTP. The overall consumption ratio would be 0.260 kWh/m<sup>3</sup> for the HRAS + PN-A system compared to 0.466 kWh/m<sup>3</sup> for a conventional WWTP.

PROGRAMOX® has proven to be an efficient and compact option for urban wastewater treatment, achieving autotrophic nitrogen removal in the main line by treating a real influent with variations in tem-



**FIGURA 11.** Izquierda: biomasa anammox decantada de la planta piloto. Derecha: efluente del reactor anammox.

**FIGURE 11.** Left: decanted anammox biomass from the pilot plant. Right: anammox reactor effluent.





### Final reactor: **anammox**

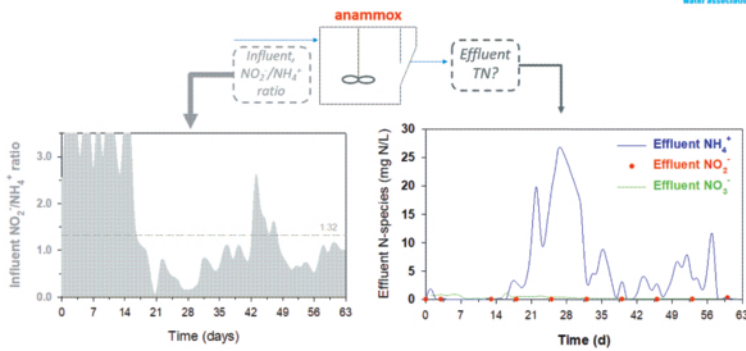
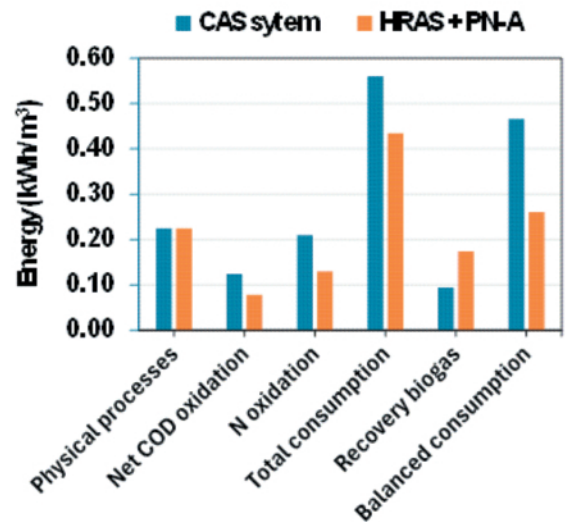


FIGURA 12. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a la entrada y salida del reactor Anammox

FIGURE 12. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> at the inlet and outlet of the Anammox reactor

FIGURA 13. Resultados del balance energético de una EDAR convencional (CAS) y el sistema HRAS-PN-A

FIGURE 13. Energy balance results for a conventional WWTP (CAS) and for the HRAS-PN-A system.



recuperada en la combustión del biogás versus el consumo total energético sería de un 40% para el sistema HRAS + PN-A frente al 17% en una EDAR convencional. La ratio global de consumo sería de 0.260 kWh/m<sup>3</sup> para el sistema HRAS + PN-A en comparación con los 0.466 kWh/m<sup>3</sup> de una EDAR convencional.

PROGRAMOX® ha demostrado ser una opción eficiente y compacta para el tratamiento de aguas residuales urbanas, consiguiendo la eliminación de nitrógeno de forma autótrofa en la línea principal mediante el tratamiento de un influente real con variaciones de temperatura y cargas. PROGRAMOX® consigue, además, reducir el consumo energético de la EDAR y aumentar la producción de biogás, un gas renovable clave para la descarbonización y la circularidad. 🌈

perature and loads. PROGRAMOX® also reduces energy consumption at the WWTP and increases the production of biogas, a key renewable gas for decarbonisation and circularity. 🌈

### REFERENCIAS/REFERENCES

Nowak, O., Enderle, P., Varbanov, P., 2015. Ways to optimize the energy balance of municipal wastewater systems: lessons learned from Austrian applications. *J. Clean. Prod.* 88, 125–131.

Carbó, O., Teixidó, J., Canals, J., Ordóñez, A., Magrí, A., Baldi, M., Gutiérrez, B., & Colprim, J. (2024). Achieving mainstream partial nitrification with aerobic granular sludge treating high-rate activated sludge effluent. *Journal of Water Process Engineering*, 60(March). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105165>

Tchobanoglous, G., L. Burton, F., & Stensel, D. H. (2014). *Metcalf & Eddy: Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. In McGraw Hill Companies, Inc. (Issue 7, p. 421).

Canals, J., Cabrera-Codony, A., Carbó, O., Torán, J., Martín, M., Baldi, M., Gutierrez, B., Poch, M., Ordóñez, A., Monclús, H., 2023. High-rate activated sludge at very short SRT: Key factors for process stability and performance of COD fractions removal. *Water Res.* 231, 119610.

O. Carbó, J. Teixidó, J. Canals, A. Ordóñez, A. Magrí, M. Baldi, B. Gutiérrez, J. Colprim. Granulación del efluente de un reactor de alta carga PRONOX® para conseguir la nitrificación parcial en la línea de agua en una EDAR. *Retema*, septiembre/octubre 2023, 26-30.

Strous, M., Heijnen, J. J., Kuenen, J. G., & Jetten, M. S. M. (1998). The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 50(5), 589–596. <https://doi.org/10.1007/s002530051340>