Primera convocatoria en concurrencia competitiva de proyectos de mejora de la eficiencia del ciclo urbano del agua (PERTE digitalización del ciclo del agua), en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia

Nº EXPEDIENTE: PCAU00074

NOMBRE DEL PROYECTO: AGUA DIGITAL NAVARRA (ADNA)/NAFARROAKO UR DIGITALA: PERTE CICLO URBANO DELA AGUA ORDEN TED/934/2022.

ACTUACIÓN "A2.1 Estudios de la calidad del estado de masas de agua y Diagnósticos ambientales del impacto de los sistemas de saneamiento en el dominio público hidráulico"

EVALUACIÓN DEL HUMEDAL DE CINTRUÉNIGO EN LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO PROVENIENTE DE LA EDAR

Fuente: www.sorigue.com

Laguna de Cintruénigo

Gestión Ambiental de Navarra, S.A.

1-. CONTEXTO Y OBJETO DEL ESTUDIO

En 2022 finalizó la ampliación de la planta depuradora de Cintruénigo, que ha permitido triplicar su capacidad alcanzando los 240 l/s. Dentro de esta ampliación se ha realizado un humedal artificial de 4000 metros cuadrados con el objetivo de retener caudales extraordinarios de agua y evitar que lleguen al río Alhama sin depurar. De esta forma, el aliviadero situado en la entrada de la depuradora desvía el caudal que la planta no puede admitir. Además, actuará como un elemento de refuerzo de la actual línea de tratamiento de las aguas residuales.

La Directiva 2000/60/CE, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas (Directiva Marco del Agua, DMA), establece en su Anejo V los indicadores químicos y fisicoquímicos que afectan a los indicadores biológicos del estado ecológico y, dentro de ellos se encuentran las condiciones en cuanto a nutrientes (Amonio, Fosfatos y Nitratos).

Una elevada concentración de nutrientes puede acelerar el crecimiento de distintos tipos de algas y plantas, facilitando la eutrofización de las aguas y perjudicando así la calidad del agua del río. Por lo tanto, es esencial medir y corregir la concentración de nutrientes y posibles contaminantes que se encuentran en los efluentes de aguas residuales para mantener el buen estado del ecosistema fluvial y proteger la fauna.

En Cintruénigo, el agua residual de la EDAR tras pasar por una primera fase de tratamiento es conducida al humedal, donde las plantas depuran el agua eliminando gran parte de los nutrientes presentes en ella. A este sistema se denomina fitodepuración.

Numerosos estudios han demostrado que los humedales artificiales son una tecnología viable para la depuración de aguas residuales, especialmente si éstas son de origen urbano. Aunque, su rendimiento puede ser menos constante que el de un proceso convencional ya que su respuesta se encuentra influenciada por los cambios de las condiciones ambientales,

incluyendo lluvias y sequías. Además, el potencial de remoción de contaminantes puede tardar varios años en estabilizarse, necesitándose al menos dos etapas del crecimiento de las plantas, sistemas de raíces, capa de residuos, y materiales del bentos, para alcanzar el equilibrio.

El nitrógeno presente en el agua residual que ingresa en el humedal se encuentra en mayor concentración en forma de amonio. Su eliminación se realiza mediante los procesos de nitrificación y desnitrificación. La nitrificación ocurre en condiciones aeróbicas, donde se transforma el nitrógeno amoniacal a nitrógeno en forma de nitratos. La desnitrificación es la transformación del nitrógeno en forma de nitratos a nitrógeno en forma de gas. Ambos procesos son dependientes de la temperatura para que se realice la conversión.

En cuanto al fósforo, habría que remarcar que el consumo de este elemento por la planta es considerado insignificante comparado con los efectos de la adsorción, mecanismo por el cual se elimina el ortofosfato presente en el agua.

La especie vegetal dominante dentro de este humedal es el carrizo (P*hragmites Australis*). El *Phragmites Australis* pertenece a la familia Poaceae, presenta una altura de entre 1,5 a 3 m y una profundidad radical de aproximadamente 0,7 m. Tiene capacidad de absorber contaminantes como plomo y zinc y, un efecto oxigenador potencialmente mayor que otras especies gracias a rizomas presentes en sus raíces.

El objeto de este informe es, en base a los datos disponibles de nutrientes a la entrada y salida del humedal, evaluar la eficiencia de remoción del humedal, cuya función es mejorar la calidad del efluente que la EDAR de Cintruénigo vierte al río Alhama.

2-. METODOLOGÍA

2.1-. Muestreo

Se han realizado muestreos semanales de agua residual tanto a la entrada del humedal como a la salida de este. Las muestras han sido recogidas en

unas arquetas localizadas en sendas ubicaciones. Posteriormente se han analizado en laboratorio.

2.2-. Análisis

La analítica obtenida en laboratorio comprende de los siguientes parámetros:

- Amonio (mg/l)
- Nitritos (mg/l)
- Nitratos (mg/l)
- Nitrógeno Total (mg/l)
- Nitrógeno Kjeldahl Total (mg/l)
- Fósforo (mg/l)
- Ortofosfato en agua (mg/l)

El *nitrógeno total* es el sumatorio de todas las formas de nitrógeno presentes en el agua, incluidos el amoniacal, el nitrógeno enlazado orgánicamente (nitrógeno total Kjeldahl), el nitrito y el nitrato.

El nitrógeno Kjeldahl es un parámetro importante en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) ya que mide el nitrógeno capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos y, posteriormente y en su caso, desnitrificado a nitrógeno gaseoso. No incluye, por tanto, los nitratos ni los nitritos.

2.3-. Tratamiento de datos

La serie de datos disponible es una primera serie anual, desde su puesta en marcha en febrero de 2023 hasta diciembre del mismo año, con una muestra semanal.

Se obtienen estadísticas de la concentración de los distintos parámetros del vertido pre y post tratamiento. Entre los estadísticos obtenidos, se incluyen:

- La media
- Mediana, cuartiles (percentiles y mínimo y máximo)
- ANOVA de un factor ($p<0,05$) con el fin estudiar si las diferencia entre los valores de entrada y salida de cada parámetro son significativas.

4-. RESULTADOS

Los datos muestran una remoción general de nitrógeno tras el paso de las aguas residuales por el humedal, no así con el fósforo.

Como se puede ver en la tabla 1, el estudio estadístico llevado a cabo (ANOVA de un factor; $p<0,05$) muestra que las diferencias entre mediciones pre y post tratamiento tiene diferencias significativas en todos los parámetros a excepción del amonio, fósforo y ortofosfato en agua.

***Tabla 1**: Resumen de valores promedios mensuales pre y post humedal y resultado estadístico para cada parámetro*.

	Amonio		Nitratos		Nitritos		N. total		N. Kjeldahl Total		Fósforo		Ortofosfato en agua	
	post	pre	post	pre	post	pre	post	pre	post	pre	post	pre	post	pre
febrero	5,28	5,67	78,57	77,27	3,22	3,55	31,50	32,67	13,00	14,00	4,60	4,50	12,30	12,57
marzo	8,39	8,02	64,22	91,12	0,68	3,68	25,20	33,70	10,46	12,00	4,18	4,96	13,21	14,74
abril	1,04	2,55	64,25	119,50	0,62	2,80	18,88	35,88	4,18	8,03	5,40	5,63	16,45	17,23
mayo	0,36	2,71	87,78	130,40	0,09	1,98	22,90	36,40	2,94	6,30	6,40	6,58	19,44	19,58
junio	0,17	1,54	15,78	90,02	0,11	1,20	5,28	26,68	1,46	5,26	4,78	4,76	15,68	15,08
julio	1,19	0,29	15,63	83,67	0,10	0,39	6,27	22,17	2,57	2,90	4,17	4,30	15,03	15,53
agosto	0,03	0,41	20,55	58,45	0,03	0,53	6,48	20,20	1,56	6,86	5,24	4,58	16,12	13,83
septiembre	3,11	1,54	0,10	35,03	0,01	0,61	4,45	13,03	4,43	4,93	3,30	1,82	10,37	5,40
octubre	2,87	3,23	12,74	47,13	0,52	1,21	7,80	18,50	4,50	7,55	2,93	2,85	9,84	9,30
noviembre	0,03	3,17	33,22	70,38	0,04	1,83	9,40	25,60	1,24	9,24	4,14	4,42	13,16	14,06
diciembre	0,59	0,94	63,20	75,85	0,90	1,42	18,10	23,28	3,35	5,70	4,15	4,25	12,85	12,75
Media	2,0	2,8	41,5	80,7	0,5	1,7	14,0	26,4	4,3	7,5	4,5	4,5	14,2	13,8
Mediana	0,2	1,3	38,8	80,5	0,1	1,3	11,4	26,0	2,5	6,4	4,4	4,5	13,7	14,2
P95	11,8	11,6	91,9	136,0	2,9	4,7	30,7	38,5	14,6	17,8	6,9	7,0	21,1	21,7
P75	2,9	3,9	72,2	97,3	0,5	2,5	23,0	33,5	5,7	8,7	5,5	5,6	16,8	16,8
P25	0,0	0,5	11,5	64,0	0,0	0,6	5,6	20,5	1,0	4,7	3,6	3,8	11,8	11,5
ANOVA (p<0,05)	0,292		8,105E-08		4,939E-07		1,152E-09		3,892E-04		0,872		0,654	

4.1-. Nitrógeno

Como se puede ver en la tabla 2, de forma generalizada, el nitrógeno ha disminuido en todas sus formas. Siendo los nitritos el parámetro que mayor remoción media anual ha presentado (73,86 %) y el amonio el parámetro que menos reducción ha presentado (6,38%), llegando a triplicar su valor de salida en el efluente en el mes de julio. El nitrógeno total y el nitrógeno Kjeldahl se han reducido un 49 y 42% aproximadamente.

La tasa de remoción de nitratos y nitritos ha sido del 50-70 % aproximadamente. Este tipo de humedales, una vez estabilizados, pueden llegar a reportar tasas de remoción de estos parámetros de entorno al 80%.

Tabla 2: *Porcentaje de la diferencia mensual entre puntos de muestreo.*

	% Diferencia					T mensual
	Amonio	Nitratos	Nitritos	N. Total	N. Kjeldahl Total	(ºC)
Febrero	-6,88	1,68	-9,39	-3,57	-7,14	5,5
Marzo	4,64	-29,52	-81,45	-25,22	-12,83	4,4
Abril	-59,12	-46,23	-77,79	-47,39	-47,98	12,6
Mayo	-86,68	-32,68	-95,40	-37,09	-53,33	15,0
Junio	-88,85	-82,47	-90,97	-80,21	-72,24	16,8
Julio	306,82	-81,32	-73,50	-71,73	-11,49	22,1
Agosto	-93,89	-64,84	-94,00	-67,92	-77,26	23,7
Septiembre	101,62	-99,71	-98,36	-65,83	-10,15	24,7
Octubre	-11,10	-72,98	-57,02	-57,84	-40,40	21,4
Noviembre	-99,21	-52,80	-98,05	-63,28	-86,58	17,7
Diciembre	-37,53	-16,68	-36,53	-22,23	-41,23	11,9
Media	-6,38	-52,51	-73,86	-49,30	-41,88	15,96

**En rojo, los meses en los que los valores han aumentado.*

El estudio de la tendencia mensual, en la gráfica 1 refleja una clara relación entre la temperatura y la remoción del nitrógeno total. Con temperaturas exteriores mayores de aproximadamente 12ºC la remoción de nitrógeno total aumenta, mientras que con temperaturas menores desciende.

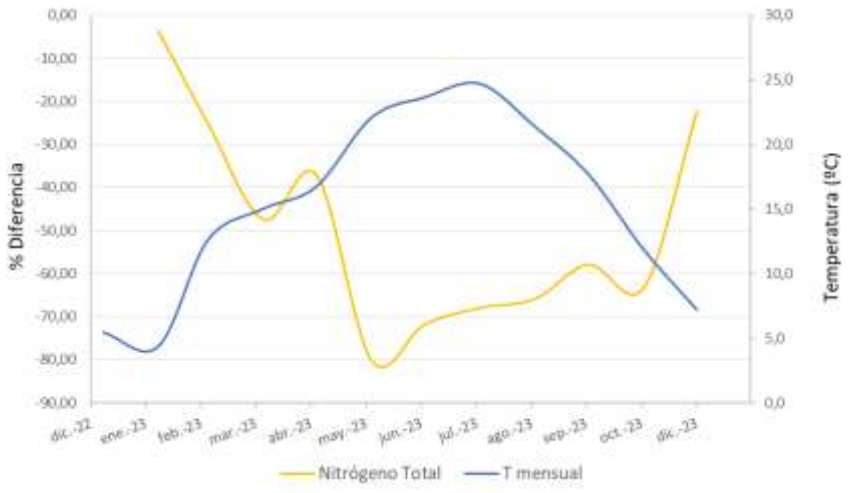

***Grafico 1**: Relación entre porcentaje de remoción de nitrógeno total y temperatura.*

El Nitrógeno Kjeldahl total, como se ve en la gráfica 2, muestra una tendencia similar al amonio. Cuando el porcentaje de amonio aumenta, la remoción de nitrógeno Kjeldahl disminuye de forma significativa. Esto es debido a que hay una relación directa entre estas dos formas de nitrógeno, es el nitrógeno Kjeldahl el nitrógeno capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos.

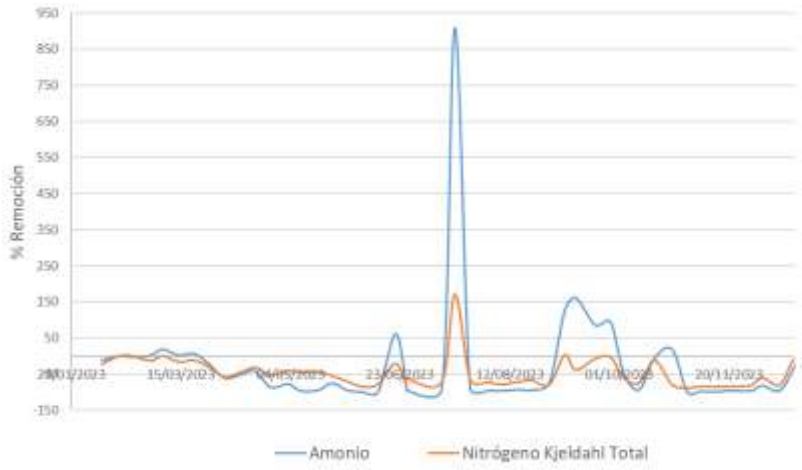

***Gráfico 2:** Relación entre remoción de Amonio y remoción de Nitrógeno Kjeldahl total.*

Según los datos obtenidos en este año, aproximadamente un 42% del nitrógeno en forma de amonio y nitrógeno orgánico puede ser removido.

4.2 Fósforo

Como se puede ver en la siguiente tabla tanto el fósforo como el ortofosfato han aumentado, sobre todo en los meses entre junio y octubre, a pesar de que la mediana muestra que la mitad de los datos de la serie presenta remoción de un 2-3% de estos parámetros. Además, como se ve en el estudio estadístico de Anova, las diferencias entre mediciones post y pre humedal no son significativas.

Tabla 3: *Resumen de valores promedio mensuales y estadístico para los parámetros de Fósforo y Ortofosfato.*

	Fósforo				Ortofosfato en agua			
	Post	Pre	Dif.	% Dif.	post	pre	Dif.	% Dif.
Febrero	4,60	4,50	0,10	2,22	12,30	12,57	-0,27	-2,12
Marzo	4,18	4,96	-0,78	-15,73	13,21	14,74	-1,53	-10,35
Abril	5,40	5,63	-0,23	-4,00	16,45	17,23	-0,78	-4,50
Mayo	6,40	6,58	-0,18	-2,74	19,44	19,58	-0,14	-0,72
Junio	4,78	4,76	0,02	0,42	15,68	15,08	0,60	3,99
Julio	4,17	4,30	-0,13	-3,10	15,03	15,53	-0,50	-3,22
Agosto	5,24	4,58	0,66	14,41	16,12	13,83	2,29	16,54
Septiembre	3,30	1,82	1,48	81,32	10,37	5,40	4,97	92,17
Octubre	2,93	2,85	0,08	2,63	9,84	9,30	0,55	5,86
Noviembre	4,14	4,42	-0,28	-6,33	13,16	14,06	-0,90	-6,40
Diciembre	4,15	4,25	-0,10	-2,35	12,85	12,75	0,10	0,78
Media	4,5	4,5	0,04	12,0	14,2	13,8	0,40	25,7
Mediana	4,4	4,5	-0,20	-3,1	13,7	14,2	-0,40	-2,2
P95	6,9	7,0	1,94	172,7	21,1	21,7	8,47	258,8
P25	3,6	3,8	-0,60	-12,8	11,8	11,5	0,50	-8,6
ANOVA (p<0,05)	0,872				0,654			

**En rojo, los meses en los que los valores han aumentado.*

En la siguiente gráfica se observa que no hay variación en el rango de dispersión de los datos, ni en las medias, aunque parece haber mayor número de datos extraordinarios en el tratamiento post humedal para el fósforo.

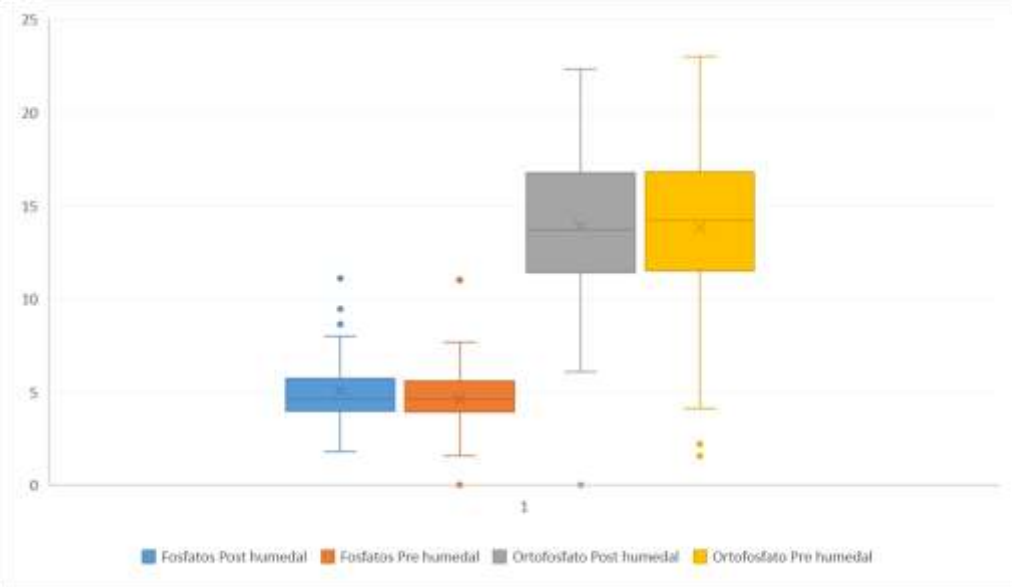

***Gráfico 3**: Diagrama de cajas para los valores post y pre humedal de Fosfatos y Ortofosfatos.*

5-. DISCUSIÓN

La importancia y trascendencia de los humedales artificiales, radica fundamentalmente en que son una alternativa viable y sustentable para la depuración de aguas residuales.

Dentro de los procesos de remoción de contaminantes como en nitrógeno y el fósforo, hay que tener en cuenta sus ciclos. El ciclo del nitrógeno puede dividirse en tres grandes secuencias: amonificación, nitrificación y desnitrificación. De esta forma el nitrógeno pasa de su forma orgánica a gaseosa.

Dentro del proceso de nitrificación, es común en humedales de nueva instalación encontrar tasas bajas de remoción de amonio. Este proceso está relacionado con el contenido de oxígeno en el agua y a su vez, con la profundidad de penetración de las raíces. La vegetación favorece la circulación del oxígeno, este es capturado por la vegetación a través de los tallos y las hojas, y llevado a la zona radicular para su aprovechamiento.

En nuestro caso, las plantas no han podido desarrollar su máximo potencial radicular, lo que justificaría las tasas obtenidas de un 6% de remoción de amonio. Este valor, también puede deberse al proceso de amonificación que sufre el nitrógeno orgánico presente en el afluente que llega al humedal tras el pretratamiento en la EDAR.

Seguidamente, en el proceso de desnitrificación es necesario que se disponga de carbono como fuente de energía. La mayor fuente de carbono para posibilitar la desnitrificación es la muerte y descomposición de las raíces. Esta fuente de carbono probablemente está más limitada durante la situación de implantación de los de humedales de flujo subsuperficial, dado que los restos de vegetación se acumulan sobre la parte superior del lecho. Con el transcurso de los años, esta capa de desechos aumenta y a medida que lo hace comienza a descomponerse, suministrando el carbono suficiente para hacer posible la desnitrificación.

En cambio, a pesar de no tener disponible el carbono por la descomposición de materia orgánica, en los primeros dos años de operación de un humedal artificial es común conseguir valores elevados de remoción de nitrógeno, como los obtenidos en este estudio. Esto es debido a que el nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas, y en la primera etapa de estabilización del humedal hay una elevada tasa de asimilación de este nutriente por parte de las plantas. Esto se traduce en un rápido crecimiento de la cubierta vegetal.

En cuanto al fósforo y ortofosfatos en agua, la remoción de estos elementos en la mayoría de los sistemas de humedales artificiales no es muy eficaz por las pocas oportunidades de contacto entre el agua residual y el terreno. Además, a pesar de ser un nutriente esencial para el desarrollo vegetal, el consumo de este elemento por las plantas es considerado insignificante comparado con los efectos de la adsorción al suelo o sedimentos, mecanismo por el cual se elimina el ortofosfato presente en el agua.

En nuestro caso, las concentraciones de estos elementos han aumentado en torno a un 6-8 %, especialmente en meses en los que la remoción de otros contaminantes ha sido mayor. Este hecho coincide con estudios en los que se ha visto que la actividad microbiana anaerobia puede liberar fósforo inorgánico al medio, incrementando su concentración.

A pesar de ello, hay estudios que afirman que, una vez establecido el humedal y tras un período de tiempo de adaptación del ecosistema a las concentraciones de fosfatos que entran del fluente el humedal funcionaría de un modo sostenido. Con tasas de remoción de entre un 30 y un 60% del fósforo presente en el afluente en función del caudal y de la carga hidráulica asociada al humedal.

Y, en muchos casos no es una solución efectiva desde el punto de vista económico considerar la remoción de fósforo con estas tecnologías.

6-. CONCLUSIÓN

A partir de los datos estudiados, el humedal artificial de la EDAR de Cintruénigo muestra un buen funcionamiento en la remoción del nitrógeno, con una disminución en el efluente del 50% de nitrógeno total. Si bien, al ser reciente su implantación, se necesita conseguir una estabilización del ecosistema del humedal para consolidar los resultados.

Para lograr una mayor tasa de remoción de amonio, sería recomendable favorecer un mayor desarrollo radicular en profundidad. Para ello, una propuesta es reducir gradualmente el nivel de agua para inducir la penetración de las raíces. Cuyo máximo, en plantas tipo carrizo, se alcanza tras tres periodos de crecimiento.

En cuanto al fósforo, se recomienda vigilar valores del efluente y en caso necesario implementar métodos fisicoquímicos de precipitación y adsorción de este compuesto.

Se recomienda seguir realizando controles de seguimiento semanales hasta alcanzar el equilibrio del ecosistema y tras él, para poder obtener resultados más robustos.