

USO DE BIORREACTORES CON MADERA PARA DESNITRIFICACIÓN DE SALMUERAS EN EL CAMPO DE CARTAGENA

Autores: Carolina Díaz-García (Becaria de investigación/ Cátedra de Agricultura Sostenible de la Universidad Politécnica de Cartagena, carolina.diaz@upct.es) , Juan Tomás García Bermejo (Profesor asociado/ Cátedra de Agricultura Sostenible de la Universidad Politécnica de Cartagena, juan.gbermejo@upct.es), Carmen Tercero Gómez/ Tragsatec, mtercero@tragsa.es), Ibrahin Tunc (Becario Erasmus/ Cátedra de Agricultura Sostenible de la Universidad Politécnica de Cartagena, iboman345@gmail.com), José Alvarez-Rogel (Profesor Titular/ Cátedra de Agricultura Sostenible de la Universidad Politécnica de Cartagena, jose.alvarez@upct.es) y Juan José Martínez-Sánchez (Catedrático de Universidad/ Cátedra de Agricultura Sostenible de la Universidad Politécnica de Cartagena, juan.martinez@upct.es)

Resumen

La contaminación de ecosistemas acuáticos por nitratos procedentes de la actividad agrícola y ganadera constituye hoy en día una preocupación para el sector agrícola, sobre todo en el Campo de Cartagena (Región de Murcia), donde el riesgo de eutrofización del Mar Menor ha hecho tomar medidas a la administración que limitan la actividad agraria. Ante el problema de la contaminación de aguas por nitratos, otros países han apostado por el desarrollo de sistemas de desnitrificación con buena relación coste-beneficio como es el sistema basado en biorreactores de madera. Con la intención de implementar en el Campo de Cartagena sistemas de desnitrificación similares para reducir el contenido de nitratos en las salmueras rechazadas de las desaladoras de agua de pozo se han llevado a cabo ensayos en prototipos rectangulares de hasta 350 L de capacidad durante 18 semanas, con tiempos de retención de 8 y 24 horas. Se pretendía evaluar la eficiencia del sistema en la desnitrificación bajo condiciones de temperatura variables debido los cambios estacionales, así como la capacidad de la madera utilizada para proporcionar carbono orgánico soluble suficiente para la desnitrificación a lo largo del tiempo. La concentración de nitrato de las salmueras objeto de estudio oscila en torno a los 200 mg L⁻¹, el pH en torno a 7.5 y la conductividad eléctrica en torno a los 18-20 dS/m. Los resultados demuestran que estos biorreactores de madera son un sistema muy eficaz y sostenible para la desnitrificación en origen de las salmueras con tiempos de retención de tan solo 24 horas (valores medios de desnitrificación del 89%). Incluso en el periodo invernal, las temperaturas de la zona son tan suaves que apenas afectan a la eficacia del sistema. Después de cinco meses de funcionamiento, las astillas utilizadas como fuente de carbono proporcionan suficiente carbono soluble para permitir altas tasas de desnitrificación.

Abstract

Pollution of aquatic ecosystems due to nitrates that come from agricultural and livestock activity is nowadays a concern for the agricultural sector. In the Campo de Cartagena (Region of Murcia), the risk of eutrophication of the Mar Menor coastal lagoon made the administration to take measures that limit agricultural activity. To face with the problem of water pollution by nitrates, other countries have chosen for the development of denitrification systems with good cost-benefit as those based on woodchip bioreactors. With the intention of implementing similar denitrification systems, in the Campo de Cartagena these systems have been evaluated to reduce the nitrate concentration in the brines rejected in the primary reverse osmosis of groundwater. Tests have been carried out on rectangular prototypes of up to 350 L capacity for 18 weeks, with retention times of 8 and 24 hours. The aim was to evaluate the efficiency of the system in a denitrification process under variable temperature conditions, due to seasonal changes, as well as the capacity of the woodchip to provide sufficient soluble organic carbon for denitrification over time. The nitrate concentration of

XII Congreso Internacional de Aedyr –Toledo, España, 23-25 Octubre,
2018

REF: AedyrTOL18-55

the influent brines under study ranges around 200 mg L⁻¹, the pH around 7.5 and the electrical conductivity around 18-20 dS/ m. The results show that these woodchip bioreactors are a very effective and sustainable system for the denitrification at source of the brines with retention times of only 24 hours (mean denitrification values of 89%). Even during the winter period, the temperatures in the area are so mild that they hardly affect the efficiency of the system. After five months of operation, the chips used as a carbon source continuous to provide enough soluble carbon to allow high rates of denitrification.

1. Introducción

El Campo de Cartagena, situado en el sureste de la Región de Murcia, tiene una extensión aproximada de 185.514 ha, de las que unas 40.000 son de regadío. Esta superficie de regadío es abastecida por el trasvase Tajo-Segura, por plantas desaladoras de agua de mar y por aguas de pozo. La insistente sequía de los últimos años, combinada con la disminución del agua del trasvase y la insuficiente producción de agua marina desalada, ha generado el incremento del consumo de aguas de pozo, fundamentalmente extraídas del acuífero del Cuaternario. Este agua no tiene una calidad suficiente como para ser utilizada directamente como agua de riego, especialmente por su elevado contenido en sales, entre ellas nitratos. Para hacerla apta para riego se instalaron toda una serie de desalobradoras en el campo de Cartagena que tratan el agua de pozo mediante procesos físicos de ósmosis inversa que generan dos corrientes de agua: una de permeado, con un nivel de sales muy bajo y apta para su uso como agua de riego, y otra de rechazo (la salmuera), que contiene elevadas concentraciones de nitratos ($200 - 300 \text{ mg L}^{-1}$), entre otras sales.

Toda esta superficie de cultivo se encuentra en la inmediaciones del Mar Menor, una laguna salada de altísimo valor ecológico, que en verano de 2016 sufrió un grave episodio de eutrofización, lo que provocó la puesta en marcha de toda una batería de acciones (BORM, 2018) para evitar la entrada de nutrientes procedentes de la agricultura a la laguna, entre ellas la clausura de los pozos que extraen agua del acuífero del cuaternario y que generaban salmueras cargadas de nitratos que a través de la rambla del Albuñón vertían al mar. Al dejar de extraer agua de pozo, los niveles del acuífero han subido lo que ha provocado a su vez una extrusión del acuífero en el Mar Menor que podría estar aportando 1.000 t año^{-1} y las $13.600 \text{ t año}^{-1}$ de nitratos, en función de cuál sea la descarga real del acuífero en el Mar Menor (García Arostegui et al., 2017). El impacto de los nitratos sobre el Mar Menor ha sido documentado en abundantes estudios científicos, muchos de ellos recopilados en trabajos de síntesis (Cabezas & Martínez, 2009; León & Bellido, 2016) así como el Informe Integral Sobre el Estado Ecológico del Mar Menor (2017) emitido por el Comité de Asesoramiento Científico del Mar Menor. En dicho informe indican que el contenido medio de nitratos en pozos del Cuaternario cercanos al Mar Menor supera los 200 mg L^{-1} .

La contaminación de ecosistemas acuáticos por nitratos disueltos en aguas de drenajes agrícolas es prácticamente universal. En aguas del Golfo de México existen gravísimos problemas de anoxia generados por la eutrofización que causan las elevadas concentraciones de nitratos de origen agrícola que arrastra el río Mississippi. Diferentes estados de EEUU han optado por implementar medidas apropiadas para la desnitrificación de las aguas, apostando por sistemas como los biorreactores de madera, debido a su buena relación coste-beneficio. De hecho, la reciente inclusión de biorreactores con astillas en las estrategias oficiales de reducción de nutrientes en varios Estados del medio oeste de EEUU (IDALS, 2014; Estrategia de Reducción de Pérdida de Nutrientes de Illinois, 2015; Minnesota PCA, 2014), así como la aceptación de los biorreactores para el tratamiento de nitrato en el drenaje agrícola como una práctica de conservación avalada por el Servicio Nacional de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA-NRCS, 2015) demuestra que hoy en día en ese país los biorreactores desnitrificadores son ya considerados una herramienta efectiva para reducir las cargas de nitrato en fuentes puntuales y difusas de aguas cargadas con dicho componente (Christianson & Schipper, 2016)

Los biorreactores de madera se basan en utilizar astillas de madera u otros materiales lignocelulósicos de escaso coste procedentes de rechazo de otras actividades (paja, mazorcas, cáscaras, restos de podas, etc.) como fuente de carbono para que los microorganismos puedan completar la desnitrificación en un contenedor, recipiente o depósito en el que se mantiene el agua estancada durante el tiempo suficiente. El aporte de carbono favorece la respiración microbiana aerobia, lo que causa un descenso del nivel de oxígeno disuelto que activa a los microorganismos anaerobios facultativos, que al no disponer de oxígeno suficiente utilizan el nitrato (NO_3^-) como fuente aceptora

de electrones dando lugar a formas de nitrógeno gaseosas (N_xO y N_2) a través del proceso de desnitrificación.

Para intentar eliminar los nitratos del acuífero del campo de Cartagena y de las salmueras procedentes del rechazo de las desalobradoras de la zona, la Cátedra de Agricultura Sostenible de la Universidad Politécnica de Cartagena inició una línea de investigación en 2017 encaminada al estudio del funcionamiento de estos sistemas de desnitrificación con biorreactores de madera.

Este trabajo muestra los primeros resultados de la desnitrificación de salmuera con biorreactores de astillas de madera instalados en la Estación Experimental Agroalimentaria Tomás Ferro (ESEA-UPCT; La Palma, Cartagena) tras cinco meses de funcionamiento (noviembre de 2017 a abril de 2018).

2. Objetivos

El objetivo general del trabajo fue evaluar la eficiencia de biorreactores de madera rellenos con restos de poda de cítricos (astillas) en la desnitrificación de salmuera procedente de agua de pozo desalobrada, en condiciones de campo cercanas a la escala real de trabajo en una finca agrícola.

Los objetivos específicos del conjunto de ensayos realizados fueron:

1. Evaluar la eficiencia del sistema en la desnitrificación bajo condiciones de temperatura variables debido a las oscilaciones térmicas diarias y los cambios estacionales.
2. Evaluar la capacidad de las astillas para proporcionar carbono orgánico soluble suficiente para la desnitrificación a lo largo del tiempo.
3. Evaluar las concentraciones de carbono orgánico soluble en los efluentes a fin de establecer si se requiere algún tratamiento antes de su vertido a un cauce o al mar.

3. Materiales y Métodos

La salmuera necesaria para los ensayos procede de una desalobradoras de agua de pozo instalada en la ESEA-UPCT. La caracterización de las salmueras procedentes de la desalobradoras (pH, CE y principales cationes y aniones) se muestran en la Tabla 1. Los valores mostrados indican una media de 33 muestras analizadas que se obtuvieron regularmente durante 18 semanas de estudio.

Para llevar a cabo los ensayos se dispusieron tres biorreactores a modo de réplicas, consistentes cada uno de ellos en un depósito de forma rectangular (142 cm x 108.5 cm x 85 cm), en cuyo centro se colocaron dos tubos de PVC verticales de 25 mm de diámetro y ranurados a 25 cm y 50 cm desde el fondo del depósito respectivamente para la medida a esas profundidades de determinados parámetros que describiremos más adelante y para la toma de muestras de salmuera (Figura 1). Los biorreactores se rellenaron con 122 kilos de astillas de madera procedentes del triturado de podas de cítricos.

Los ensayos comenzaron el 20 de noviembre de 2017. A partir de esa fecha y hasta el 18 de abril de 2018, en cada semana se realizaban tres ciclos consecutivos de inundación de las astillas, de 24 horas cada uno (los días lunes, martes y miércoles). Cada ciclo comienza a las 8:00 de la mañana y termina a la misma hora del día siguiente. Se inicia el ciclo introduciendo la salmuera en los biorreactores con astillas, hasta que éstas quedan completamente sumergidas. El volumen de salmuera introducida en cada uno de los biorreactores es medido por contadores de agua colocados a la entrada de cada biorreactor, oscilando entre los 250 y 300 litros, aunque durante las tres primeras semanas admitieron algo más de 350 L debido a que las astillas no estaban completamente empapadas.

Tabla 1. Características del agua de pozo y de las salmueras generadas por la desalobrador.

| | Pozo | SD | Salmuera | SD |
|--|-------|-------|----------|-------|
| Cl ⁻ (mg L ⁻¹) | 1521 | 23,67 | 5763 | 594,1 |
| NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹) | 0,70 | 0,00 | 2,01 | 4,97 |
| NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹) | 74,57 | 5,33 | 197,6 | 29,16 |
| HPO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹) | 0,76 | 0,00 | 3,51 | 6,66 |
| SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹) | 1274 | 18,18 | 5075 | 730,2 |
| Ca ²⁺ (mg L ⁻¹) | 347,5 | 103,7 | 1065 | 195,2 |
| Mg ²⁺ (mg L ⁻¹) | 200,2 | 24,98 | 947,1 | 220,9 |
| Na ⁺ (mg L ⁻¹) | 856,0 | 106,9 | 3635 | 551,3 |
| NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹) | 0,40 | 0,00 | 0,89 | 0,91 |
| K ⁺ (mg L ⁻¹) | 9,95 | 2,13 | 63,36 | 32,31 |
| pH | 7,43 | 0,25 | 7,56 | 0,35 |
| CE (dS m ⁻¹) | 6,12 | 0,55 | 19,33 | 0,65 |

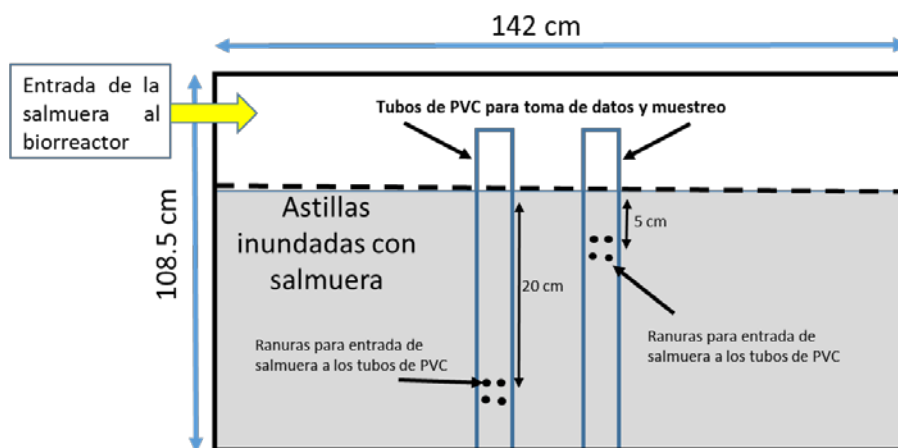


Figura 1. Esquema de un biorreactor

En cada ciclo de inundación se tomaba una muestra de salmuera antes de comenzar a llenar los biorreactores para su análisis posterior. Una vez introducida la salmuera en el interior de los biorreactores se monitorizan determinados parámetros que influyen en el proceso de desnitrificación (T^a , pH y Eh) a diferentes tiempos de retención hidráulica (TRH): 30 minutos, 2 horas, 4 horas, 6 horas, 8 horas y 24 horas del comienzo del ciclo. Esta cadencia de toma de datos se mantuvo entre las semanas 1 y 10. De la semana 11 a la 18 se añadió un tiempo más de monitoreo a las 10 horas, teniendo por tanto datos a los 30 minutos, 4 h, 6 h, 8h, 10 h y 24 h. Además, a partir de la semana 12 se añadieron el oxígeno disuelto y la CE a los parámetros medidos. Durante las 18 semanas de ensayo se han tomado 1.560 medidas de cada uno de los parámetros de T^a , pH y Eh y 224 medidas de oxígeno disuelto y de CE.

A su vez, en cada uno de esos tiempos se tomaron muestras de salmuera para su posterior análisis. Durante las semanas 1 a 9 dichas muestras se tomaron en todos los TRH, de la semana 10 a la 12 sólo se tomaron a los 30 minutos, 8 horas, 10 horas y 24 horas del comienzo de cada ciclo de inundación. A partir de la semana 13 se muestreó la salmuera a los 30 minutos, 10 horas y 24 horas.

Todas estas muestras se enviaron a los laboratorios para el análisis de nitrato, nitrito y amonio. Los análisis de carbono orgánico soluble (COS) y de nitrógeno total soluble (TNS) se centraron sobre todo en las muestras tomadas a las 8 horas, 10 horas y 24 horas, según el paso de las semanas que, por tanto, no está en contacto directo con las astillas. Una vez que nueva salmuera ha fluido al interior de los tubos de PVC se procede a realizar la medición *in situ* de Tª, pH, Eh y, a partir de la semana 12, también oxígeno disuelto y CE. Para obtener esas medidas se introducen electrodos adecuados en los tubos de PVC ranurados hasta sumergirlos en la salmuera del interior. Los electrodos van conectados a un medidor de pH portátil Crison pH 25+. Las medidas del Eh se corrigen de acuerdo con Vepraskas & Faulker (2001) añadiendo +200 mV al voltaje medido (valor de referencia del electrodo de Ag/AgCl a 20 °C). De la semana 13 en adelante, se utilizó para realizar estas medidas el aparato Hanna HI98194 pH/EC/DO Multiparameter, que además aporta los datos de oxígeno disuelto y CE. Inmediatamente después de anotar las medidas de los parámetros citados se introduce de nuevo el toma-muestras en los tubos de PVC y se extrae la muestra de salmuera correspondiente, que se guarda en viales de 100 ml en el frigorífico hasta su análisis, previo filtrado con papel de filtro CHM F2040 grade de tamaño de poro 7-9 µm.

Tras el muestreo de las 24 horas, los biorreactores se vacían y el efluente de los mismos es conducido mediante tuberías de PVC de 50 mm a un depósito de 1 m³, desde donde, mediante una bomba, es dirigido al embalse de almacenamiento.

Los análisis de las muestras se realizan en el Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT) de la UPCT, en el laboratorio del Grupo de Investigación Edafología Ambiental, Química y Tecnología Agrícola de la ETSIA-UPCT y en la EDAR Torre Pacheco.

3.1. Análisis realizados

Carbono orgánico soluble (COS) y nitrógeno total soluble (NTS): Se han medido en un analizador de carbono y nitrógeno TOC-V CSH de Shimadzu del SAIT-UPCT. También se analizaron en algunas muestras los parámetros DQO y DBO5 por parte de la entidad de Saneamiento de la Región de Murcia (ESAMUR).

Nitratos, nitritos y amonio: Con el fin de agilizar estas analíticas, la medida de nitratos, se ha realizado por dos métodos diferentes: cromatografía iónica (en el SAIT-UPCT) y, a partir de la semana 11, cuando la materia orgánica disuelta era lo suficientemente baja para no producir interferencias, con el espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 25 V/UV. Para evaluar que las concentraciones de nitratos medidos por los dos métodos eran similares se midieron 34 muestras por ambos y se compararon los resultados, obteniéndose un ajuste muy aceptable para el conjunto de muestras ($r^2=0,9139$) y excelente para muestras con concentraciones de nitrato menores de 100 mg L⁻¹ ($r^2=0,9974$).

3.2. Cálculo de eficiencia en la reducción de nitratos

Con los datos obtenidos se ha calculado el rendimiento de la desnitrificación en base a la *Eficiencia en la Reducción de Nitrato* (ERN), según los trabajos de Jafari et al. (2015) y de Moussavi et al. (2015):

$$ERN (\%) = \frac{(C_{in} - C_{out})}{C_{in}} \times 100$$

Donde C_{in} y C_{out} indican las concentraciones de nitrato (g NO₃⁻ L⁻¹) en la salmuera de entrada y en la de salida (efluente), respectivamente.

4.- Resultados y Discusión

La media de las temperaturas mínimas en el interior de los biorreactores a lo largo del periodo de estudio fue de $12,7 \pm 2,47$ °C, estando la mayor parte del tiempo por encima de 10°C (Figura 2). Tan sólo se registraron temperaturas por debajo de los 10 °C (en concreto entre 8 y 10 °C) los días 7 (semana 3), 17 (semana 6), los días 28, 29 y 30 (semana 10) y el día 32 (semana 11). La media de las máximas fue de $15,2 \pm 2,3$ con algunos picos puntuales de temperatura que superaron los 18 °C (días 23, 44 y 54) e incluso los 19 °C (días 4, 22, 35, 52 y 53). Llama la atención la bajada de las temperaturas máximas de los días 28, 29 y 30 (semana 10), que apenas alcanzaron los 10 °C. Por término medio, la diferencia diaria entre las temperaturas máximas y mínimas de las salmueras contenidas en los biorreactores fue escasa (2,4 °C).

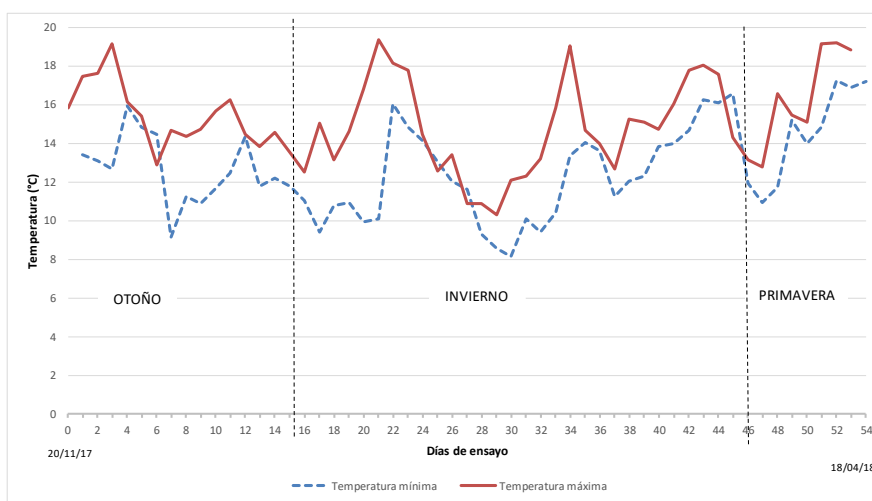


Figura 2. Evolución de las temperaturas máximas y mínimas de las salmueras contenidas en los biorreactores

La salmuera objeto de estudio presentó, normalmente, valores de pH que oscilaron entre 7,5 y 8. Dentro de los biorreactores dichos valores, estuvieron, en general, entre 7 y 7,6. Los valores de este parámetro suelen caer ligeramente desde los 30 minutos hasta las 24 h de inundación. De hecho en los primeros días de funcionamiento del sistema ese descenso progresivo de pH puede llevar a valores ligeramente por debajo de 7, que se pueden atribuir a la presencia de ácidos orgánicos a causa de la elevada concentración de materia orgánica soluble que se produce en las primeras fases de lavado de las astillas de madera.

Las concentraciones de nitrito (NO_2^-) y de amonio (NH_4^+) no se ha representado gráficamente su evolución porque su presencia en el sistema fue poco o nada significativa, mostrando valores muy bajos o, en la mayoría de los casos, por debajo del límite de detección del cromatógrafo iónico. Únicamente se detectó una subida muy significativa de las concentraciones de amonio durante las primeras horas del primer día de funcionamiento, pero que prácticamente desapareció a las 24 horas. En cuanto al nitrito, ocurrió algo similar.

Las concentraciones de NO_3^- en el interior de los biorreactores tendieron claramente a disminuir a lo largo de las 24 h de duración de los ciclos, lo que demuestra la elevada actividad desnitrificadora que se genera en los biorreactores. No obstante, esta disminución de las concentraciones de NO_3^- fue diferente de unas semanas a otras, lo que provocó diferentes valores de eficiencia en la desnitrificación (Figuras 3 y 4).

La eficiencia en la reducción de nitratos (ERN) en el sistema ha ido variando en concordancia con las concentraciones de nitrato en la salmuera a diferentes tiempos de retención hidráulica. Así, el porcentaje de nitratos retirados de la salmuera cuando ésta permanece en contacto con las astillas

durante 8 horas (TRH 8h) estuvo por encima o muy próxima al 80% en las cuatro primeras semanas (Figura 3). En la semana 5 el rendimiento fue algo inferior que en las anteriores, bajando bastante en las semanas 6 y 7 (entre un 40 y un 55% de reducción según los días), para recuperarse ligeramente en la octava semana (60-65%) y volver a descender en la novena y la décima (30-55%). A partir de la semana 12 se da una progresiva recuperación en la eficiencia, obteniéndose de nuevo eficiencias del 80% o casi en las semanas 15 y 18 (Figura 3). Se aprecia una oscilación en el rendimiento de los biorreactores más o menos paralela a las oscilaciones de la temperatura de la salmuera. Destacar que las semanas seis y siete (días 16 a 21) y la semana 10 (días 28 a 30) fueron las más frías del periodo estudiado y las de menor eficiencia en la reducción de nitratos. Destacar también en que esta tendencia paralela descrita entre la evolución de la temperatura y de la eficiencia en la reducción de nitratos no se dio en la semana 3 (días 7 a 9, Figura 3), cuando bajó la temperatura mínima pero no la eficiencia en la reducción de nitratos. Este hecho puede explicarse por la gran cantidad de carbono que había en el sistema en los primeros días de funcionamiento y por el hecho que las temperaturas máximas no fueron demasiado bajas.

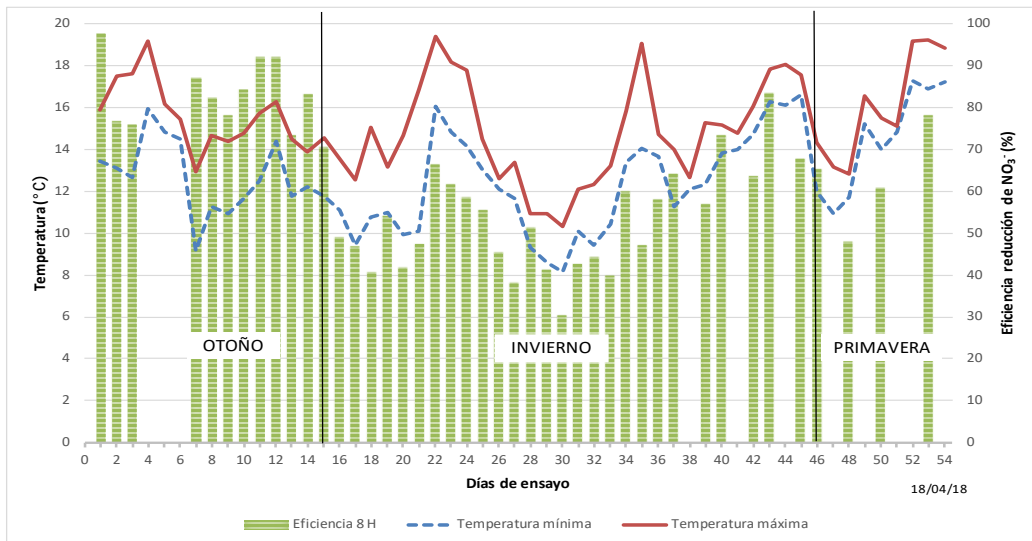


Figura 3. Evolución de la eficiencia en la reducción de los nitratos (%) en THR de 8 horas, frente a la evolución de las temperaturas en los biorreactores

Cuando el TRH fue de 24 horas (Figura 4), la eficiencia en la reducción de nitratos fue mucho más elevada que con tiempos de retención de 8 o 10 horas. Durante las primeras cinco semanas el porcentaje de reducción en la concentración de nitratos fue de aproximadamente el 95% y a partir de la semana doce casi del 100%. Las semanas más frías y que menos eficiencia mostraron con TRH de 8 horas, que fueron la 6, la 7 y la 10, mostraron a 24h de TRH reducciones del 75-85% en las dos primeras semanas citadas y del 55 al 75% en la semana 10 (Figura 4). En la Figura 4 se observa cómo a 24h de TRH las oscilaciones fueron menos acusadas que a 8h de TRH por causa de las oscilaciones de temperatura.

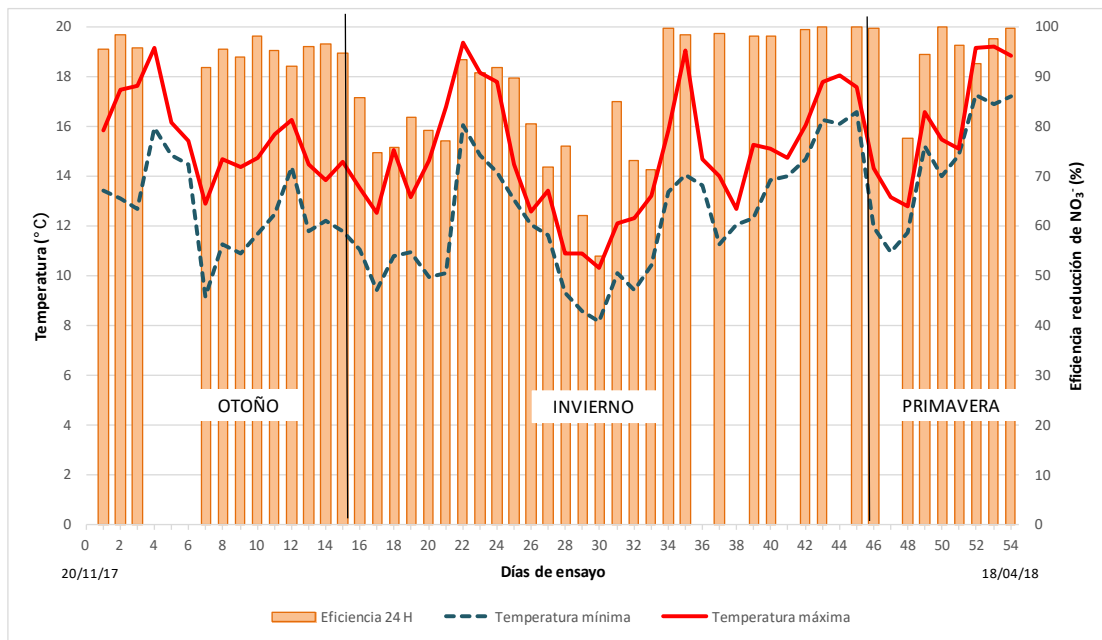


Figura 4. Evolución de la eficiencia en la reducción de los nitratos (%) en THR de 24 horas, frente a la evolución de las temperaturas en los biorreactores

La Figura 5 muestra la evolución del NTS medido en la salmuera del interior de los biorreactores a las 8h de TRH durante el tercer ciclo semanal (semanas 1 a 18) y en el efluente recogido al finalizar dicho ciclo a 24 h de TRH (semanas 10 a 18). En los primeros días de ensayo las concentraciones de NTS fueron muy altas pero bajaron rápidamente para estabilizarse a partir de la quinta semana en torno a 10 o 20 mg L⁻¹ (con alguna subida en las semanas 9, 10 y 11 que fueron las menos eficientes en retirada de nitrato). Los datos de NTS a las 24 h muestran concentraciones de entre 10 y 15 mg L⁻¹ a partir de la semana 11.

En la Figura 6 se representan las concentraciones de carbono orgánico disuelto (COS) para las mismas muestras del tercer ciclo semanal en las que se midió el. Se observa cómo la primera semana, sobre todo el primer día, a las 8h las salmueras contenían más de 1.500 mg L⁻¹ de COS. No obstante, el descenso de estas elevadísimas concentraciones de COS del primer día fue muy rápido y al tercer día de ensayo ya habían bajado a 300 mg L⁻¹ aproximadamente. Durante la tercera y cuarta semana de ensayos ya tan sólo aparecían concentraciones de 70-80 mg L⁻¹, que fueron bajando paulatinamente para estabilizarse en torno a los 10-15 mg L⁻¹ a partir de la semana 9. Como se observa en la Figura 6, la concentración de COS a las 24 h era más o menos similar a la de las 8h. Llama la atención en la citada gráfica el aumento del COS que se produjo en las dos últimas semanas 17 y 18, que puede explicarse porque dichas semanas estuvieron precedidas por un periodo de dos semanas sin inundación. Se ha demostrado que cuando un sistema que sufre anoxia con frecuencia por estar encharcado pasa por periodos de no inundación, la mineralización de la materia orgánica no sólo no cesa sino que se activa. Esto sucede porque la entrada de oxígeno produce una recuperación de las comunidades microbianas aerobias y anaerobias facultativas, que son más eficientes en la mineralización. Al mineralizarse más intensamente la materia orgánica parte de los compuestos de carbono solubles pueden acumularse en el sistema y se solubilizan en el agua cuando éste vuelve a inundarse provocando un pico de COS.

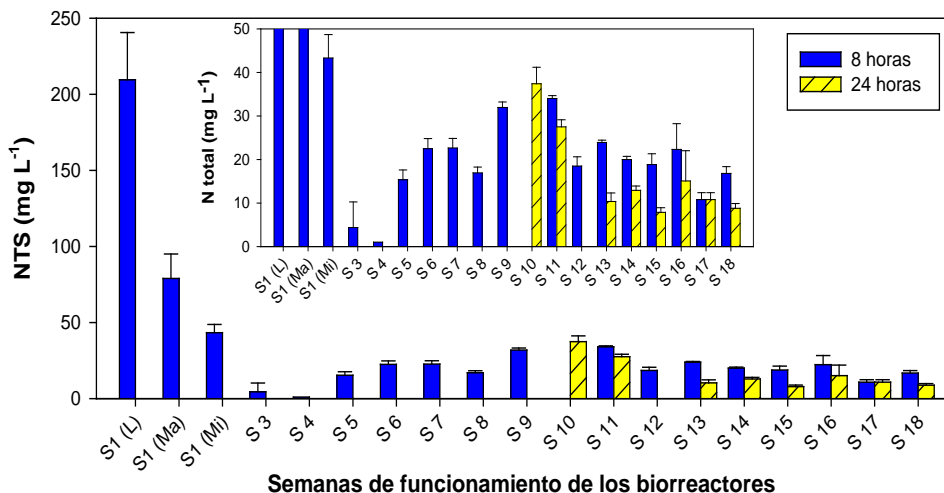


Figura 5. Promedios de nitrógeno total soluble (mg L^{-1}) en las muestras sacadas a las 8 de TRH y en el efluente a 24 horas de TRH del tercer día de cada ciclo semanal (excepto para la semana 1 que se incluyen los datos de los tres días).

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) entre las semanas 9 y 18, osciló entre los 100 y los 140 mg L^{-1} , con valores de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO_5) muy bajos, entre 10 y 15 mg L^{-1} . Como se ha comentado en el apartado VI.2.4.1, actualmente ESAMUR está llevando a cabo análisis de respirometría para conocer en detalle la biodegradabilidad del carbono soluble de los efluentes. Durante la redacción de este informe se han recibido los primeros datos (relativos a la semana 18), que indican valores de DQO relativamente bajos (112 mg L^{-1}) y con una fracción fácilmente biodegradable muy elevada (79%).

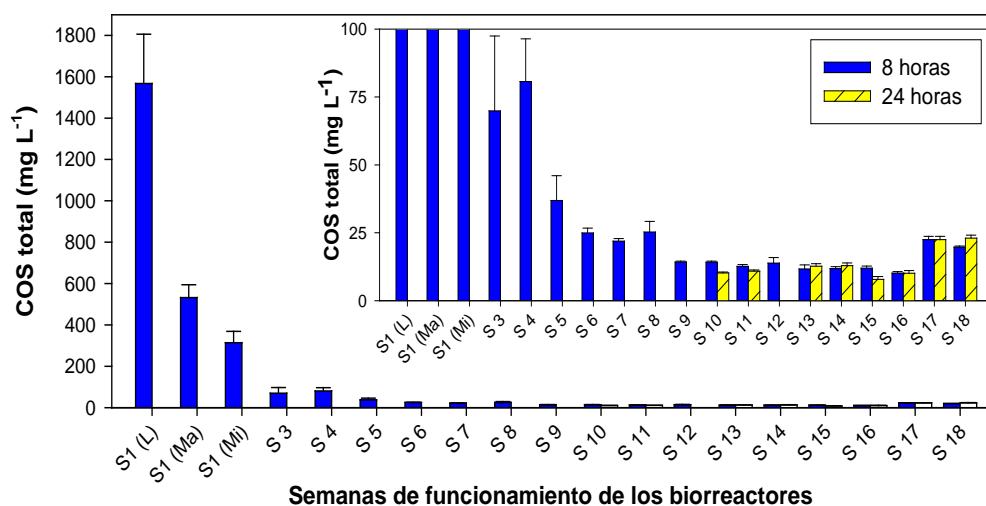


Figura 6. Promedios de carbono orgánico soluble (COS) (mg L^{-1}) en las muestras sacadas a las 8 de TRH y en el efluente a 24H de TRH del tercer día de cada semana (excepto para la semana 1 que se incluyen los datos de los tres días).

Estos resultados indicarían que, en el caso de que los efluentes de salmuera contuvieran cargas orgánicas demasiado elevadas para vertido (DQO por encima de 125 mg L^{-1}), no sería problemático rebajar esas cargas por métodos convencionales de depuración. No obstante, al tratarse de los

primeros y únicos datos disponibles no han sido considerados a la hora de redactar las conclusiones de este informe, a la espera de disponer de mayor volumen de análisis de estos parámetros.

5. Conclusiones

Los ensayos realizados han demostrado que estos biorreactores de madera son un sistema muy eficaz y sostenible para la desnitrificación en origen de las salmueras en el Campo de Cartagena con tiempos de retención de tan solo 24 horas (valores medios de desnitrificación del 89%). Incluso en el periodo invernal, las temperaturas de la zona son tan suaves que apenas afectan a la eficacia del sistema cuando los tiempos de retención hidráulica alcanzan las 24 horas.

Las astillas utilizadas como fuente de carbono proporcionan suficiente carbono soluble para permitir altas tasas de desnitrificación después de cinco meses de funcionamiento.

Es necesario implementar una fase de experimentación con este tipo de biorreactores a escala de finca en diferentes explotaciones agrícolas con pozos autorizados que extraigan distintos caudales y tipos de salmuera (con diferente salinidad y concentración de nitratos). En estas explotaciones se seguiría monitorizando el funcionamiento del sistema a largo plazo para obtener el máximo de información que sirva para las mejoras adicionales que se pudieran implementar (utilización de otras fuentes de carbono, diferentes tamaños de astillas, siembra de microorganismos, control de temperatura, etc.).

6. Agradecimientos

Todos los ensayos han sido financiados por la Cátedra de la UPCT de Agricultura Sostenible para el Campo de Cartagena, soportada por trece cooperativas agrícolas del Campo de Cartagena, junto a Fecoam, Coag y Caixabank. Agradecer la ayuda del Servicio de Apoyo a la Investigación de la UPCT y de ESAMUR en el análisis de las muestras y a las a las empresas de desalación INSAL y ECOGEST por su colaboración.

7. Bibliografía

BORM (2018). Ley 1/2018, de 7 de febrero, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor. Boletín Oficial de la Región de Murcia número 36.

Cabezas, F. & Martínez, A. (2009). Estado actual del conocimiento científico, Murcia: Instituto Euromediterráneo del Agua.

León, V. M. & Bellido, J. M. (2016). Mar Menor: una laguna singular y sensible. Evaluación científica de su estado, s.l.: Instituto Español de Oceanografía. Ministerio de Economía y Competitividad.

USDA-NRCS (2015). Conservation practice standard denitrifying bioreactor code 605. Washington DC: USDA-NRCS.

IDALS (2014). Iowa nutrient reduction strategy: A science and technology-based framework to assess and reduce nutrients to Iowa waters and the Gulf of Mexico. [En línea]

Available at: <http://www.nutrientstrategy.iastate.edu/>

Christianson, L. E. & Schipper, L. A. (2016). Moving Denitrifying Bioreactors beyond Proof of Concept: Introduction to the Special Section. *Journal of Environmental Quality*, pp. 757-761.

Christianson, L. E., 2011. Design and performance of denitrification bioreactors for agricultural drainage. Iowa: Iowa State University.

Moorman, T. B., Parkin, T. B., Kaspar, T. B. & Jynes, D. B. (2010). Denitrification activity, wood loss, and N₂O emissions over 9 years from a wood chip bioreactor. *Ecological Engineering*, 36(11), pp. 1567-1574.