

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

**Evaluación de sistemas de lagunaje artificial
para la fitodepuración de lixiviados
procedentes de la horticultura intensiva**

Mención: Hortofruticultura y Jardinería

Modalidad: Trabajo Técnico-Experimental

Curso 2020/2021

Alumno/a: Francisco Villanueva Blanes

Director/es:

María Teresa Lao Arenas

Evangelina Medrano Cortés

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



Escuela Superior de Ingeniería

Grado en Ingeniería Agrícola

Mención en Hortofruticultura y jardinería

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva

Alumno:

Francisco Villanueva Blanes

Director:

María Teresa Lao Arenas

Codirector:

Evangelina Medrano Cortés

Almería, Julio 2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría mostrar mi agradecimiento a mis tutores Dña. Evangelina Medrano Cortés (IFAPA-Almería) y María Teresa Lao Arenas (Universidad de Almería) por haber querido ayudarme a realizar este trabajo.

Un especial agradecimiento a Dña. Evangelina Medrano Cortés, por su incansable apoyo y esfuerzo mostrado en la realización de este trabajo, así como por los conocimientos aportados hacia mi persona.

Al personal de IFAPA quiero dar las gracias por haber ayudado, de manera directa o indirecta, en la realización del proyecto, en especial a D. Rafael León.

También quiero agradecer a todos mis compañeros y amigos de la carrera que me han acompañado durante estos años. Gracias a ellos todo ha sido más fácil y llevadero.

Por último, pero no por ello menos importante, quiero agradecer a mis familiares, a mis amigos, a ID y a toda la gente que ha formado parte de este trayecto. De entre ellos, agradezco de forma especial a mi madre, que ha sido mi pilar fundamental durante esta etapa.

No me puedo olvidar de mi abuelo Antonio, al que le hubiera hecho mucha ilusión verme acabar la carrera.

“No mires el reloj, haz lo mismo que él, ve avanzando” (Sam Levenson)

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

ÍNDICE GENERAL

1	Antecedentes.....	2
1.1	Cultivo en sustrato en Almería.....	2
1.2	Impacto ambiental de la producción hortícola en sustrato.....	4
1.3	Sistemas de depuración de aguas residuales y lixiviados de agricultura.....	5
1.3.1	Precipitación electroquímica de fósforo.....	5
1.3.2	Fitodepuración con <i>Lemna Minor</i>	6
1.3.3	Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). Reactor de biofilm de lecho móvil.....	6
1.3.4	Humedales artificiales.....	7
1.4	Sistema de lagunaje artificial.....	7
2	Objetivos.....	10
3	Fases de realización y cronograma asociado.....	10
4	Desarrollo del trabajo experimental: especificaciones generales y técnicas.....	11
4.1	Localización.....	11
4.2	Sistemas de cultivo.....	11
4.2.1	Sistema abierto (SA).....	11
4.2.2	Sistema cerrado (SC).....	12
4.3	Diseño de los sistemas de lagunaje artificial.....	12
4.4	SLA asociado al sistema de cultivo abierto.....	13
4.5	SLA asociado al sistema de cultivo cerrado.....	14
4.5.1	Sistemas de seguridad instalados en SLA asociado a SC.....	15
4.6	Especies de plantas utilizadas en los SLA asociados a SA y SC.....	16
4.7	Determinaciones del balance hídrico: efluente de entrada y de salida.....	19
4.8	Determinación del contenido en NO_3^- y Na^+	19
4.9	Seguimiento del desarrollo de las plantas en el SLA asociado a SA.....	20
5	Documentación gráfica del ensayo.....	21
6	Resultados y discusión.....	25
6.1	Seguimiento del desarrollo de las plantas en el SLA asociado a SA.....	25
6.2	Evaluación de la capacidad de eliminar NO_3^- en los SLA asociados a SA y SC.....	29
6.2.1	Resultados en SLA asociado a SC.....	29
6.2.2	Resultados en SLA asociado a SA.....	32
6.3	Evaluación de la capacidad de eliminación de sodio en el SLA asociado a SA.....	37
6.4	Evaluación del volumen de lixiviados a depurar en ambos sistemas.....	38
6.4.1	Volumen depurado en SLA asociado a SA.....	38

**Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados
procedentes de la horticultura intensiva.**

6.4.2	Volumen depurado en SLA asociado a SC.	39
7	Conclusiones.....	41
8	Referencias bibliográficas.....	42
	Anejos.....	44

**Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados
procedentes de la horticultura intensiva.**

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Porcentajes de reducción del contenido de nitratos.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2. Variables utilizadas en el análisis estadístico de SLA asociado a SC en el Anejo II.</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3. Porcentajes de reducción del contenido de NO₃⁻.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 4. Variables utilizadas en el análisis estadístico de SLA asociado a SA en Anejo.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 5. Porcentajes de reducción de la concentración de sodio cada día de toma de muestra.</i>	<i>38</i>

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Distribución del cultivo en sustrato en función de la superficie invernada. (García y col., 2016).....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Distribución porcentual en base a superficie de los distintos sustratos utilizados en cultivo sin suelo en diferentes campañas (García y col., 2016).....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3. Cronograma del trabajo.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Evolución de la altura de las plantas (1).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5. Evolución de la altura de las plantas (2).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6. Evolución del contenido en nitratos del efluente de entrada y de las plantas.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7. Tendencia de reducción de nitratos según el día juliano.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8. Evolución de la concentración de nitratos de I. pseudacorus, H. portulacoides, P. australis, y T. domingensis.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9. Evolución de la concentración de NO₃⁻ de C. longus, J. maritimus, S. holoschoenus, y J. effusus.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 10. Tendencia de reducción de nitratos frente a los días julianos (1).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 11. Tendencia de reducción de nitratos frente a los días julianos (2).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12. Evolución de la concentración de sodio.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13. Comparativa entre los volúmenes diarios y semanales lixiviados por el sistema SLA asociado a SA.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 14. Comparativa de los volúmenes diarios y semanales lixiviados por el sistema SLA asociado a SC.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 15. Esquema del SLA asociado a SA.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 16. SLA asociado a SC.....</i>	<i>78</i>

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

ÍNDICE DE IMÁGENES

<i>Imagen 1. Lemna minor (lenteja de agua).</i>	6
<i>Imagen 2. Soportes plásticos para microorganismos en la tecnología MBBR (Chamorro, 2019).</i>	7
<i>Imagen 3. Ciclo de la Tecnología CLEANLEACH.</i>	9
<i>Imagen 4. Cultivo de tomate Cherry en invernadero “Biogreen”.</i>	21
<i>Imagen 5. SLA asociado a SA (Sistema abierto en invernadero “Biogreen”).</i>	21
<i>desde el frente (31/05/2021).</i>	21
<i>Imagen 6. SLA asociado a SA visto desde arriba (15/04/2021).</i>	22
<i>Imagen 7. SLA asociado a SC (Sistema cerrado en invernadero "C8").</i>	22
<i>Imagen 8. Construcción SLA asociado a SC: antes.</i>	23
<i>Imagen 9. Construcción fosos SLA asociado a SC.</i>	23
<i>Imagen 10. SLA asociado a SC.</i>	23
<i>Imagen 11. Depósito de descartes en SLA asociado a SC.</i>	24
<i>Imagen 12. Análisis con medidores LAQUA-Twin.</i>	24
<i>Imagen 13. I. pseudacorus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.</i>	26
<i>Imagen 14. C. longus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.</i>	26
<i>Imagen 15. H. portulacoides día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.</i>	27
<i>Imagen 16. P. australis día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.</i>	27
<i>Imagen 17. J. maritimus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.</i>	27
<i>Imagen 18. S. holoschoenus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.</i>	28
<i>Imagen 19. J. effusus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.</i>	28
<i>Imagen 20. T. domingensis día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.</i>	28

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

RESUMEN.

En Almería, la mayoría de los cultivos hortícolas en sustrato son sistemas abiertos donde los lixiviados (drenaje del cultivo) producidos no son reutilizados, y suelen ser vertidos al medio ambiente. Esta solución de drenaje contiene altas concentraciones de NO_3^- , PO_4^{3-} y K^+ (Huett y col, 2005).

Ante la creciente tendencia que existe en la horticultura almeriense por minimizar al máximo el impacto ambiental producido por su actividad, en todos sus niveles, se debe apostar por la reutilización y/o tratamiento de los lixiviados.

De hecho, siguiendo la Directiva de Nitratos de 1991, se declaran Zonas Vulnerables a la Contaminación por Nitratos (NVZs) aquellas áreas con una concentración límite tanto para aguas superficiales como subterráneas de 50 mg L^{-1} ($1 \text{ mg L}^{-1} = 1 \text{ ppm}$) de NO_3^- , resultando muchas zonas en Europa declaradas NVZ (CEE, 1991), donde se incluyen las zonas de producción hortícola protegida de la provincia de Almería. Por ende, los vertidos de lixiviados que proceden de los cultivos en sustrato no son compatibles con las reglas establecidas en esas NVZs, ya que generalmente contienen altas concentraciones de NO_3^- .

Se ha hecho uso de la tecnología Cleanleach, desarrollada en el proyecto europeo CLEANLEACH. Este proyecto inicialmente tenía el propósito de tratar los lixiviados procedentes de viveros de plantas ornamentales, mediante un sistema de lagunaje artificial (SLA) y con ayuda de un aporte de carbono, estimulando el proceso de desnitrificación anaeróbica llevado a cabo por las colonias de bacterias heterótrofas que conviven en las plantas del SLA. Se fija el objetivo de utilizar dicha tecnología en el tratamiento de los lixiviados procedentes de los cultivos hortícolas en sustrato.

Este trabajo tiene como finalidad el análisis y la comparación de dos sistemas de depuración mediante lagunaje artificial de las soluciones de drenaje procedentes de los cultivos en sustrato, persiguiendo la reducción del contenido de NO_3^- y Na^+ para reducir el efecto contaminante que tienen estas soluciones al ser vertidas al medio.

Se dispone de dos sistemas de lagunaje artificial:

- Un SLA asociado a un cultivo de tomate en sustrato de fibra de coco cuyos drenajes no son reutilizados, es decir, asociado a un sistema abierto (SA). Tenemos una serie de especies asociadas a este SLA (*Iris pseudacorus*, *Scirpus holoschoenus* y *Chrysopogon zizanioides*), que serán las encargadas de depurar esos drenajes.
- Un SLA asociado a otro cultivo de tomate en sustrato de fibra de coco cuyos drenajes son reutilizados en los sucesivos riegos, es decir, asociado a un sistema cerrado (SC). En sistema de cultivo cerrado, los descartes al medio son menos frecuentes, y se realizan cuando la solución recirculada presenta una elevada conductividad eléctrica debido a la acumulación de los iones presentes en el agua y cuya tasa de absorción por la planta es reducida, como es el caso del Na y el Cl. Realmente si realizamos descartes, no sería un sistema cerrado al uso si no que se trataría de un sistema semicerrado. Al igual que el SLA asociado a SA, este SLA tiene una serie de especies asociadas (*Iris pseudacorus*, *Cyperus longus*, *Halimione portulacoides*, *Phragmites australis*, *Juncus maritimus*, *Scirpus holoschoenus*, *Juncus effusus* y

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Typha domingensis), cuyo fin es el mismo que el anterior, y es la depuración de los lixiviados producidos por el cultivo, disminuyendo su factor contaminante.

Cada sistema de lagunaje artificial se ha concebido de forma diferente en cuanto a su construcción, el tipo de plantas fitodepuradoras y la dinámica de aportación de los lixiviados a depurar.

Los resultados que se han obtenido muestran una eficiencia en el proceso de desnitrificación de hasta un 90%. Además, se realizó un análisis estadístico, en el que se estudiaba la influencia en el proceso de depuración de cada planta en el tiempo. Para SLA asociado a SC, se determinó que el crecimiento, y por tanto el efecto de *I. pseudacorus* y *C. Zizanioides* no tuvo relación con el tiempo, sin embargo, *S. holoschoenus* si mostró esta relación. En SLA asociado a SA, todas las plantas presentaron una relación estadísticamente significativa, debido a que el ensayo se inició con las plantas recién plantadas, de manera que con el paso de los meses su efecto depurador ha ido en aumento.

También se estudió la capacidad de reducción de NO_3^- del sistema en función de los siguientes parámetros: temperatura media (T), humedad relativa media (HR), integral de radiación media diaria (IR) y caudal semanal depurado (Q). Para SLA asociado a SC, *I. pseudacorus* y *C. zizanioides* no presentaron relación con ninguna de las variables, mientras que la reducción de NO_3^- de *Scirpus holoschoenus* tuvo relación con la T. En cuanto a las plantas del SLA asociado a SA, *I. pseudacorus* y *J. effusus* presentaron relación con IR y HR. *Scirpus holoschoenus* presentó relación con Q, IR y HR, y *T. domingensis* con T y HR.

En cuanto a la capacidad de absorción de Na^+ , no se han obtenido resultados concluyentes, pero si una buena tendencia en torno al 30% en la reducción, por lo que se tendrá que seguir evaluando.

Por último, se cuantificó el volumen depurado en ambos SLA, notando como el asociado a SC depura cuatro veces menos lixiviados que el asociado a SA, debido a la práctica de la recirculación que permite el ahorro de agua utilizada para riego y de fertilizantes.

Palabras clave: Nitratos, bacterias y sustratos.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

ABSTRACT.

In Almeria, most of the horticultural crops grown on substrate are open systems where the leachates (crop drainage) produced are not reused, and are usually discharged into the environment. This drainage solution contains high concentrations of NO_3^- , PO_4^{3-} and K^+ (Huett et al., 2005).

In view of the growing trend in horticulture in Almeria to minimise the environmental impact of its activity at all levels, the reuse and/or treatment of leachates should be encouraged.

In fact, following the 1991 Nitrates Directive, Nitrate Vulnerable Zones (NVZs) are declared to be those areas with a limit concentration for both surface water and groundwater of 50 mg L⁻¹ (1 mg L⁻¹= 1ppm) of NO_3^- , resulting in many areas in Europe being declared NVZs (EEC, 1991), where the protected horticultural production areas of the province of Almeria are included. Therefore, leachate discharges from substrate crops are not compatible with the rules established in these NVZs, as they generally contain high concentrations of NO_3^- .

Use has been made of the Cleanleach technology, developed in the European CLEANLEACH project. This project initially aimed to treat leachate from ornamental plant nurseries by means of an artificial lagooning system (ALS) and with the help of a carbon input, stimulating the anaerobic denitrification process carried out by the colonies of heterotrophic bacteria living on the plants in the ALS. The aim is to use this technology in the treatment of leachates from horticultural crops grown in substrate.

The aim of this work is to analyse and compare two systems for the purification by artificial lagooning of drainage solutions from substrate crops, with the aim of reducing the NO_3^- and Na^+ content in order to reduce the polluting effect of these solutions when they are discharged into the environment.

Two artificial lagooning systems are available:

- A ALS associated with a tomato crop on coconut fibre substrate whose drains are not reused, i.e. associated with an open system (SA). We have a series of species associated with this ALS (*Iris pseudacorus*, *Scirpus holoschoenus* and *Chrysopogon zizanioides*), which will be responsible for purifying these drains.
- A ALS associated with another tomato crop in coconut fibre substrate whose drains are reused in successive irrigations, i.e. associated with a closed system (SC). In a closed cultivation system, discards to the medium are less frequent, and are carried out when the recirculated solution has a high electrical conductivity due to the accumulation of ions present in the water and whose absorption rate by the plant is reduced, as is the case of Na and Cl. In fact, if discards are carried out, it would not be a closed system in use, but a semi-closed system. Like the ALS associated with SA, this SLA has a series of associated species (*Iris pseudacorus*, *Cyperus longus*, *Halimione portulacoides*, *Phragmites australis*, *Juncus maritimus*, *Scirpus holoschoenus*, *Juncus effusus* and *Typha*

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

domingensis), whose purpose is the same as the previous one, and is the purification of the leachates produced by the crop, reducing its polluting factor.

Each artificial lagooning system has been conceived differently in terms of its construction, the type of phytodepuration plants and the dynamics of leachate input to be treated.

The results obtained show an efficiency in the denitrification process of up to 90%. In addition, a statistical analysis was carried out, in which the influence on the purification process of each plant over time was studied. For ALS associated with SC, it was determined that the growth, and thus the effect of *I. pseudacorus* and *C. Zizanioides* had no relationship with time, however, *S. holoschoenus* did show this relationship. In ALS associated with SA, all plants showed a statistically significant relationship, due to the fact that the trial started with recently planted plants, so that over the months its purifying effect has been increasing.

The NO_3^- reduction capacity of the system was also studied as a function of the following parameters: mean temperature (T), mean relative humidity (RH), mean daily radiation integral (IR) and weekly purified flow (Q). For ALS associated with SC, *I. pseudacorus* and *C. zizanioides* showed no relationship with any of the variables, while NO_3^- reduction of *Scirpus holoschoenus* was related to T. As for the SLA plants associated with SA, *I. psedacorus* and *J. effusus* were related to IR and HR. *Scirpus holoschoenus* was related to Q, IR and HR, and *T. domingensis* to T and HR.

As for Na^+ absorption capacity, no conclusive results were obtained, but there was a good trend of around 30% in the reduction of Na^+ , which will have to be evaluated further.

Finally, the volume purified in both SLA was quantified, noting that the one associated with SC purifies four times less leachate than the one associated with SA, due to the practice of recirculation, which saves water used for irrigation and fertilisers.

Keywords: Nitrates, bacteria and substrates.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

1 Antecedentes.

1.1 Cultivo en sustrato en Almería.

El cultivo en sustrato en Almería se introduce en los años setenta, con la aparición de los sistemas de cultivo en sacos de turba, pero debido a una pobre tecnificación y formación del agricultor, no resultaron interesantes (Cánovas y Magán, 2003). En los años ochenta, el cultivo en sustrato pasa de ser un modelo experimental, a empezar su expansión.

Fue realmente en los años noventa donde la superficie en sustrato sufrió su gran expansión, especialmente a final de esta. El auge en la utilización del cultivo en sustrato se debió principalmente al aspecto económico, ya que resultaba más barato en este momento que la implantación de un enarenado, como sistema de cultivo almeriense tradicional (Salas y Urrestarazu, 2002).

El cultivo en sustrato suponía el 19,8 % de la superficie invernada en la campaña 1999/2000, unas 4.800 ha (Pérez-Parra y Céspedes, 2001). Y realmente desde principios de los años 2000 los investigadores intuían un incremento de superficie en sustrato, cito textualmente “De cara al futuro próximo, el desarrollo de los cultivos sin suelo parece irreversible y continuado, incluso es de esperar que se acelere su desarrollo conforme estos sistemas sean mejor adaptados a la zona y su manejo se facilite y mejore” (Cánovas y Magán, 2003). Sin embargo, se produce un estancamiento en la extensión del cultivo en sustrato, registrándose en la campaña 2005/2006 un 20,4 % de la superficie invernada (Céspedes y col, 2009).

A partir de entonces, la superficie de cultivo en sustrato comenzó a descender, arrojando datos de un 9,8 % de la superficie invernada en la campaña 2012/2013 (García y col, 2016) (Fig. 1).

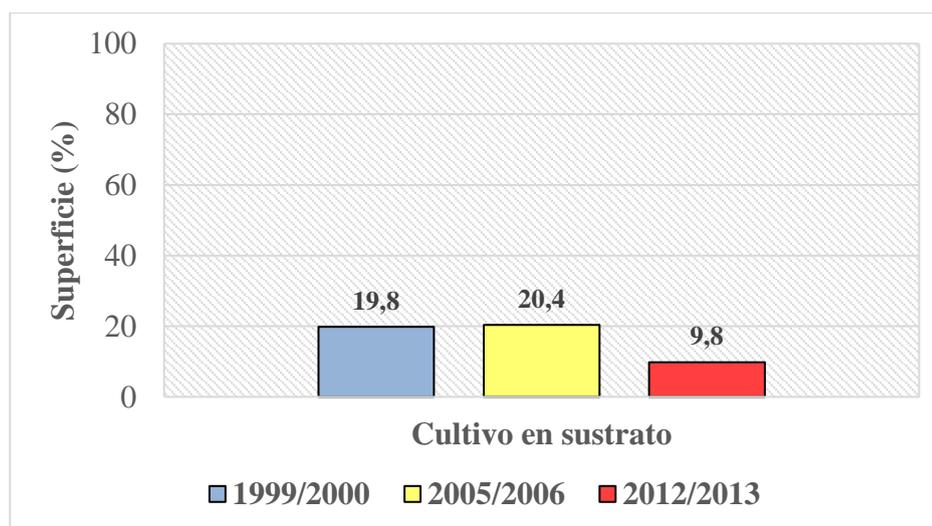


Figura 1. Distribución del cultivo en sustrato en función de la superficie invernada. (García y col., 2016)

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

En Almería se cuenta actualmente, de forma aproximada, con 3.000 ha de cultivos hortícolas en sustrato, donde se reparten entre lana de roca, y sobre todo perlita y fibra de coco. Sin embargo, el uso de estos en Almería ha ido variando con el paso de los años, la perlita siempre ha sido el predominante. En la figura 2 se presenta la evolución de la fibra de coco, cuyo uso durante la primera década de los 2000 era muy escaso, y por el contrario en esta última década se está apostando mucho más por él. Se pueden encontrar además algunos otros tipos de sustratos, cuyo uso está todavía bastante por debajo de los ya mencionados, como pueden ser turba, arena, cortezas de árboles, etc.

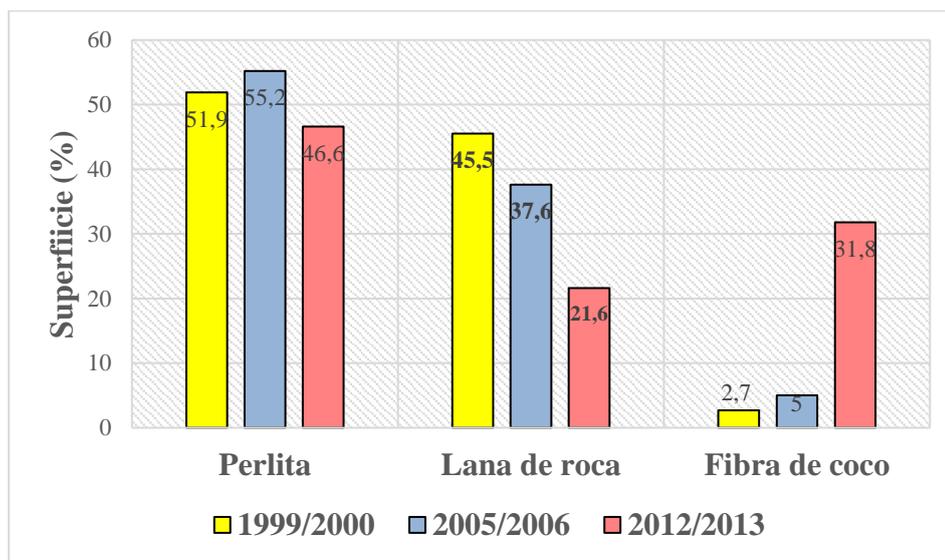


Figura 2. Distribución porcentual en base a superficie de los distintos sustratos utilizados en cultivo sin suelo en diferentes campañas (García y col., 2016).

Cabe destacar también, que hay preferencias en la provincia en cuanto a cultivos y sustratos, es decir, en perlita por ejemplo se suele cultivar principalmente tomate, aunque también podemos destacar el pepino, y para el pimiento es prácticamente el único sustrato sobre el que se cultiva. La lana de roca destaca en pepino, y es además el sustrato más utilizado en sandía, usándose también en el tomate. En fibra de coco el cultivo principal es el tomate, seguido de berenjena, pero también encontramos en menor cantidad calabacín y melón. La hegemonía actualmente se la reparten tomate y pepino en el cultivo de sustrato en Almería (García y col., 2016).

Por último, la utilización del cultivo en sustrato implica en la mayoría de las ocasiones la utilización de estructuras más especializadas, y con esto nos referimos al tipo de invernadero a utilizar. Y de hecho este tipo de sistema de cultivo es muy escaso en invernaderos tipo parral plano y monocapilla, y es muy frecuente en invernaderos multitunel, los cuales favorecen al establecimiento del cultivo. Sin embargo, como ya sabemos, los invernaderos que más predominan en Almería son los parrales multicapilla, siendo común la utilización de sustrato en este tipo de estructura, aunque menos habitual que el multitunel (Lorenzo y col., 2016).

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

1.2 Impacto ambiental de la producción hortícola en sustrato.

En un sistema de producción hortícola, tanto en suelo, como en este caso en sustrato, se producen una serie de entradas (radiación, plántulas, agua, fertilizantes, etc), y salidas (cosecha, residuos, lixiviados, etc). De las salidas podríamos destacar una gran cantidad de productos desechables que se producen cada campaña, como son los residuos plásticos, residuos vegetales, envases de productos fitosanitarios; todos ellos desechos los cuales son recogidos, por su difícil degradación, en busca de una segunda vida útil.

Sin embargo, si hablamos de los lixiviados que se producen en el día a día en estos sistemas de producción, son vertidos al medio produciendo un efecto adverso como la contaminación de aguas superficiales, contaminación de aguas subterráneas... Este efecto adverso de debe en gran parte a que los lixiviados contienen altas concentraciones de NO_3^- , PO_4^{3-} y K^+ (Huett y col, 2005). Si en la zona del Poniente ya veníamos arrastrando el problema de falta de agua, por diversos factores, entre ellos la sobreexplotación e intrusión marina en nuestros acuíferos, la reducción del vertido de lixiviados y la mitigación de su poder contaminante deben ser una realidad, y de hecho es algo en lo que cada día se trabaja más.

El hecho de que sea perjudicial el vertido de los lixiviados se debe a su composición iónica, producto de la fertilización que, aunque hace aumentar el rendimiento de nuestros cultivos, con un incremento de su uso en las últimas décadas (Salas y col., 2003). Por otra parte, la eficiencia del uso de fertilizantes aumenta cuanto mayor sea la coincidencia de su disponibilidad con las necesidades nutritivas de la planta (Tolón y Lastra, 2010).

No obstante, de las soluciones lixiviadas, los nitratos (NO_3^-) son los más perjudiciales debido a su gran movilidad y fácil lavado, haciendo que acaben fácilmente en los acuíferos. Por eso, hay que tener especial atención con ellos en el cultivo en sustrato, donde el nitrógeno no captado por el cultivo es lavado por lixiviación, al contrario que en cultivo en suelo que podría ser retenido por el suelo.

Siguiendo la Directiva de Nitratos, en Europa muchas áreas afectadas por la contaminación de NO_3^- se han declarado como Zonas Vulnerables a la Contaminación por Nitratos (NVZs) (CEE, 1991), donde se incluyen las zonas de producción hortícola protegida de la provincia de Almería. En estas áreas NVZs se estableció una concentración límite de NO_3^- , tanto para aguas superficiales como subterráneas, de 50 mg L^{-1} ($1 \text{ mg L}^{-1} = 1 \text{ ppm}$). Por lo tanto, los vertidos de lixiviados procedentes de los cultivos en sustrato no son compatibles con las reglas establecidas en las NVZs, ya que normalmente su concentración de N-NO_3^- es muy elevada.

En Almería, de las 3.000 ha que hay de cultivos en sustrato, la mayoría de ellos vierten directamente los lixiviados al medio. Por tanto, se debe apostar por la disminución del contenido de N-NO_3^- los lixiviados, y/o realizar menos vertidos al medio, como podría ser mediante recirculación de esta solución, que podría implicar una disminución en el uso de fertilizantes e incluso un ahorro considerable de agua.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

1.3 Sistemas de depuración de aguas residuales y lixiviados de agricultura.

A la vista de los problemas que conllevan los lixiviados de la actividad hortícola en el medio, debemos optar por buscar una forma de tratarlos, para su reutilización, de forma que podemos encontrar una amplia gama de procesos y tecnología para tratar dichas soluciones y eliminar sus agentes perjudiciales. Aunque realmente, la mayoría de los procesos y los sistemas de depuración están orientados a las aguas residuales urbanas, de forma que progresivamente se van adaptando a la agricultura. Podríamos citar una gran cantidad de procesos, pero reiteramos que solo unos pocos se están llevando a cabo para tratar soluciones lixiviadas de agricultura, como la precipitación electroquímica de fósforo, fitodepuración con *Lemna minor*, reactor de Biofilm de lecho móvil y sistemas de lagunaje artificial (Appelman y col., 2018).

1.3.1 Precipitación electroquímica de fósforo.

La finalidad de este tratamiento es la eliminación del fósforo de las aguas residuales, minimizando así el impacto en el medio ambiente.

Consiste en un proceso electroquímico de precipitación de fósforo (P), llevado a cabo en una célula electrolítica compuesta por un cátodo y un ánodo de magnesio (Mg). El líquido tratado fluye entre los dos electrodos, y al aplicar una corriente se produce un proceso electrolítico. Durante la reducción catódica, el agua se divide, formando iones hidróxido (OH^-), elevando el pH, y se desprende hidrógeno gaseoso (H_2). A su vez, en el ánodo se produce la oxidación de Mg metálico, haciendo que los iones de Mg^{2+} se disuelvan y reaccionen con el PO_4^{3-} y con el NH_4^+ , o el K^+ contenido en el agua, formando sales de fósforo compuestas principalmente por estruvita, la cual puede ser utilizada posteriormente de forma directa como fertilizante. Posteriormente la gravedad separa las sales de fósforo formadas. La tasa de eliminación de fósforo del agua y su conversión en estruvita se encuentra en torno al 80%.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

1.3.2 Fitodepuración con *Lemna Minor*.

Su finalidad es reducir el nitrógeno (N), el fósforo (P), y otros nutrientes de aguas residuales, así como limitar el crecimiento de algas.



Imagen 1. *Lemna minor* (lenteja de agua).

L. minor, comúnmente conocida como lenteja de agua, es una especie de planta acuática que utiliza los nutrientes del agua para crecer, consumiendo una considerable cantidad de N y P contenidos en el agua, cubriendo la superficie del agua. Al cubrir la superficie, reduce la cantidad de luz que entra en el agua. Los factores de eliminación de nutrientes, y la cobertura de la superficie, limitan el crecimiento de las algas.

La capacidad depurativa, así como un correcto crecimiento vienen determinados por la composición del agua. En términos generales, se desarrolla mejor con temperaturas entre 26°C y 28°C, disminuyendo su capacidad con temperaturas que se acerquen a los 0°C.

La calidad de crecimiento de esta especie viene determinada por la composición del agua, ya que no crece en cualquier tipo de agua, sino que debe estar entre unos límites determinados de diversos factores.

1.3.3 Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). Reactor de biofilm de lecho móvil.

Es una técnica de depuración utilizada para minimizar el impacto producido en el medio ambiente por la descarga de nutrientes, en cultivo sin suelo. Su uso se concentra en la eliminación de NO_3^- en aguas residuales domésticas o industriales, y en aguas procedentes de piscicultura, aunque también se refleja su uso en menor medida en actividades agrícolas.

Esta técnica combina las ventajas que nos ofrecen los procesos de lodos activados (aireación y bacterias) y de película fija (superficie que contiene biomasa en su estructura).

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

El elemento principal de esta técnica son pequeñas películas o soportes de plástico, como podemos ver en la imagen 1, con una elevada superficie específica. Los microorganismos se adhieren a estos soportes que están suspendidos en un reactor, y que se mantienen en constante movimiento mediante agitadores o mediante aireadores. De esta forma, los soportes se distribuyen de forma uniforme en el reactor, de forma que las impurezas pasan por los soportes, y los microorganismos realizan su función de depuración.



Imagen 2. Soportes plásticos para microorganismos en la tecnología MBBR (Chamorro, 2019).

1.3.4 Humedales artificiales.

Es un método que consiste en la construcción de pequeños humedales donde conviven diversas especies de plantas con capacidad de depuración del agua. Los humedales reducen los nutrientes que contiene el agua, los cuales son asimilados a la biomasa vegetal, mejorando la nitrificación y desnitrificación.

Se construyen unos fosos que van a permanecer constantemente con agua, se impermeabilizan y se rellenan con grava. La grava servirá como sustrato para las especies de plantas que dispongamos. En el interior del foso, se colocarán tubos de drenaje, mediante los que la solución ya depurada pueda salir.

Por tanto, estaríamos hablando de ecosistemas artificiales que utilizan las funciones naturales de la vegetación, el suelo y los microorganismos para tratar soluciones de agua contaminantes para el medio ambiente.

1.4 Sistema de lagunaje artificial.

El sistema de lagunaje artificial (SLA) consiste en simular o reproducir los procesos de autodepuración natural que tienen lugar en los cursos y acumulaciones de agua. La tecnología de este sistema está formada por lagunas conectadas en serie, donde

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

se producen una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, que derivan en la depuración de las aguas residuales.

Estos sistemas de lagunaje se componen de dos elementos principales, como son el sustrato filtrante, y la vegetación. El sustrato hace la función de soporte de la vegetación, así como la fijación de la población microbiana, en biopelículas, encargadas de la mayoría de los procesos de depuración. La vegetación se compone de las plantas emergentes acuáticas (macrófitos), y tiene la función de servir de sustento para la formación de películas microbianas, así como filtración y adsorción de partículas de las aguas residuales, y contribuye a la oxigenación del sustrato. La vegetación también limita el crecimiento de algas, al impedir el paso de la luz, y también favorecen la eliminación de nutrientes.

A su vez, podemos encontrar diferentes tipos de sistemas de lagunaje artificial, en función de la forma en la que suministramos a estos el agua residual, por lo que tenemos humedales artificiales de flujo superficial, de flujo subsuperficial, y humedales artificiales de macrófitas flotantes.

- **Humedales artificiales de flujo superficial:** En este tipo de sistema, el agua residual circula de forma superficial a través de tallos y hojas caídas, incluso raíces más superficiales, donde se desarrolla la película bacteriana. En este caso, la eficiencia de depuración y eliminación de sólidos suspendidos depende de la longitud del humedal, por lo que es normal que en los humedales de flujo superficial nos encontremos instalaciones grandes, formadas por balsa o canales con vegetación emergente, y con poca profundidad de agua. La entrada de agua es continua, y se mueve a muy baja velocidad por el sistema, debido al flujo laminar y a la resistencia de raíces y plantas. La función principal de este sistema es la de eliminar los sólidos en suspensión.
- **Humedales artificiales de flujo subsuperficial:** En este sistema, el agua residual transcurre a través del sustrato de forma subterránea por los espacios del lecho filtrante, poniéndose en contacto con los rizomas y raíces de la vegetación del humedal. En los humedales artificiales de flujo subsuperficial, el agua puede fluir de forma horizontal o vertical.
En los humedales de flujo subsuperficial horizontal, el agua circula en sentido horizontal a través del sustrato. Por el contrario, en los humedales de flujo subsuperficial de sentido vertical, el agua fluye en sentido vertical a través del lecho. Estos dos tipos de humedales se suele utilizar principalmente como tratamiento secundario, precedido de uno primario en el que se eliminan la mayoría de los sólidos que provocarían obstrucciones en el sustrato.
- **Humedales artificiales de macrófitas flotantes:** En este caso, no disponemos de un sustrato donde la planta se fije, sino que, mediante alguna estructura artificial, las plantas permanecen flotando en la superficie. En este sistema, el lugar donde se desarrolla la población microbiana lo aporta la planta, como pueden ser en sus raíces. Según la profundidad del humedal, este puede emplearse como tratamiento primario o secundario, ya que en aquellos sistemas en los que el humedal sea más profundo

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

predominará la decantación, permitiendo la eliminación de sólidos, mientras que en los sistemas con humedales con poca profundidad predominará los procesos aeróbicos de degradación de la materia orgánica.

En esta línea de los sistemas de lagunaje artificial, cabe destacar el proyecto europeo CLEANLEACH (www.cleanleach.eu), que hace posible la recirculación de los lixiviados en el sistema de riego, aprovechando los NO_3^- y los PO_4^{3-} como fertilizantes, o bien tratarlos mediante procesos naturales. La idea surge debido al problema que había en los viveros con los lixiviados que se producían.

El sistema CLEANLEACH está formado por dos tecnologías principales de gestión ecológica de los lixiviados producidos en viveros, como son la recuperación de lixiviados, y la filtración y el tratamiento natural (imagen 3).

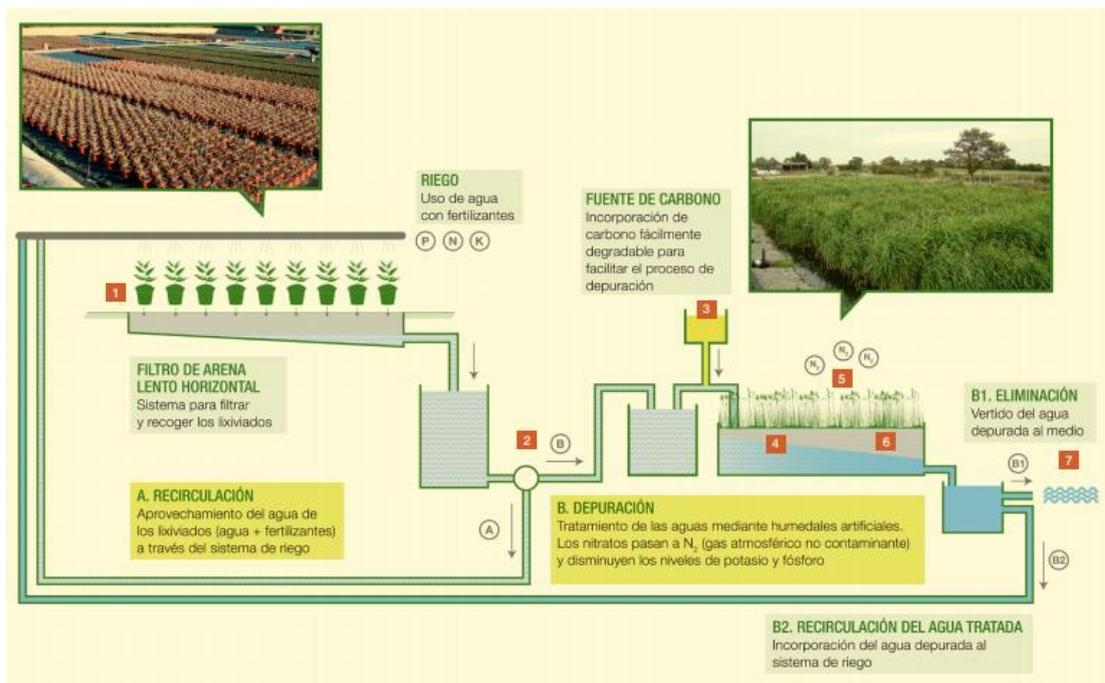


Imagen 3. Ciclo de la Tecnología CLEANLEACH.

Una vez que se aplica el riego en el cultivo, los lixiviados resultantes pasan por un filtro de arena lento horizontal y seguidamente se recogen en un tanque o balsa. Teniendo los lixiviados almacenados, tenemos dos opciones, podemos recircular esta solución en el sistema de riego, o por el contrario, podríamos dirigir ésta hacia el sistema de humedal artificial aplicando una fuente de carbono que promoverá los procesos de depuración. Una vez que la solución ya depurada sale del sistema de lagunaje, volvemos a tener dos opciones, una primera en la que el agua sería vertida al medio en condiciones mucho menos contaminantes que si no fuera tratada, o podríamos incorporarla al sistema de riego para ser recirculada. Esta tecnología se ha aplicado para la depuración de lixiviados procedentes de cultivos hortícolas en sustrato en Almería (Medrano y col., 2019).

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

2 Objetivos.

El objetivo principal de este estudio consiste en la evaluación de la capacidad de reducción del contenido de NO_3^- de las diferentes plantas que componen dos sistemas de depuración mediante lagunaje artificial de los lixiviados procedentes de dos cultivos de tomate en sustrato, uno de ellos en sistema abierto (SA) y otro en sistema cerrado (SC), buscando reducir la contaminación que produce el vertido de estos en el medio. Además, dentro del objetivo principal se incluye la evaluación de la capacidad de eliminación de sodio (Na^+).

Del objetivo principal derivan varios objetivos:

- La evaluación de la capacidad de reducción de nitratos, en función del volumen de lixiviados a depurar semanalmente en el SLA asociado a SA y en el SLA asociado a SC.
- Estudio de la evolución de la reducción de NO_3^- en el tiempo.
- Estudio de la relación entre la reducción de NO_3^- con las variables climáticas temperatura (T), humedad relativa media (HR) e integral de radiación media diaria (IR), así como su relación con el volumen semanal a depurar.
- Cuantificación del volumen de lixiviados que se producen en un sistema de cultivo abierto frente a los que se produce en un sistema de cultivo cerrado.

3 Fases de realización y cronograma asociado.

	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Toma de datos				
Elaboración de resultados				
Redacción de la memoria				

Figura 3. Cronograma del trabajo.

En el proyecto se pueden diferenciar dos etapas:

La primera de ellas consiste en la toma de datos, que abarca casi la totalidad del tiempo empleado en el trabajo, donde se realizan los análisis de concentraciones y la cuantificación del volumen de agua depurado. Además, haremos un seguimiento del desarrollo de las plantas, el cual puede beneficiar en la depuración de los drenajes.

La segunda etapa comprende el inicio de la redacción del proyecto, así como la elaboración de resultados, de manera que finalmente podamos realizar las

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

determinaciones pertinentes. Las horas que se han empleado en la toma de datos, en el seguimiento, y en la redacción de la memoria han sido aproximadamente 250 horas.

4 Desarrollo del trabajo experimental: especificaciones generales y técnicas.

4.1 Localización.

El estudio se ha realizado en el Centro de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica (IFAPA) La Mojonera, en Almería, que se encuentra a una latitud de 36° 47' N y a una longitud de 2° 42' W.

La clasificación climática de la zona contempla un régimen térmico templado-cálido de inviernos tibios, y un régimen hídrico árido estricto (Gandullo y col, 1998).

4.2 Sistemas de cultivo.

Se dispone de dos sistemas de cultivo, un sistema de cultivo abierto (SA), donde los drenajes no son reutilizados, y un sistema de cultivo cerrado (SC), donde se practica la recirculación de la solución de drenaje del cultivo. A ambos sistemas se les ha asociado un sistema de lagunaje artificial independiente.

4.2.1 Sistema abierto (SA).

Este primer sistema de cultivo se compone de un cultivo de tomate Cherry, variedad "Seychelle" en sustrato de fibra de coco, bajo un invernadero multicapilla de 896 m² con orientación Este-Oeste cuyo nombre en el centro IFAPA es "Biogreen". El sustrato de fibra de coco está soportado sobre una canalización de polietileno (PE) que permite recoger la fracción de drenaje que se produce en cada riego. En este caso, los drenajes no son reutilizados y van directamente al exterior donde se les hace pasar por un SLA para su fitodepuración antes de ser evacuados al medio.

Debemos tener en cuenta que la gestión del riego del cultivo de tomate se realiza mediante un sensor de radiación instalado en el exterior del invernadero y conectado al cabezal de riego, de tal forma que cuando se alcanza la integral de radiación establecida (Ej.: 1000 Wh m⁻²) se activa el riego. Por tanto, la frecuencia de riegos depende de la radiación, por lo que en días nublados habrá menos riegos.

Una vez que se da un riego en el invernadero, el drenaje (lixiviados) es recogido en canaletas y enviado directamente al sistema de lagunaje artificial asociado, que reducirá su contenido en NO₃⁻ y Na⁺ antes de ser vertido al medio.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

4.2.2 Sistema cerrado (SC).

El SC es un cultivo de tomate pera, variedad “Caniles” en sustrato de fibra de coco, en un invernadero tipo multitunel con orientación Este-Oeste, con 1.000 m² de superficie, cuyo nombre en el centro IFAPA es “C8”.

En este caso los drenajes del cultivo son canalizados y recogidos en un depósito de recirculación. Posteriormente son diluidos con agua de riego, y se utilizan en sucesivos riegos, y por ello se denomina sistema cerrado.

Sin embargo, no es cerrado completamente, ya que debido a la acumulación de sales disueltas en el agua de riego como es el caso del Na⁺, cuya tasa de absorción por el cultivo es baja, alcanza una conductividad eléctrica (CE) que puede ser perjudicial para el cultivo, por lo que se realiza un descarte de esta solución, y se comienza a regar el cultivo con una nueva solución nutritiva que volvería a empezar el ciclo. Los descartes de este sistema presentarán, por tanto, una menor frecuencia que los de SA.

El control de riego en SC se lleva a cabo según las necesidades en el consumo hídrico del cultivo, por medio de las bandejas de riego a la demanda provistas de sensores de nivel e integradas en las líneas de cultivo. Cuando se activa el riego, la solución lixiviada del depósito donde recogemos los lixiviados se impulsa mediante una bomba al tanque de mezcla del cabezal de abonado donde se reequilibra la nueva solución nutritiva, ajustando CE y pH mediante sensores. La proporción de inyección de fertilizantes se modifica en función de la composición de la solución del depósito de recirculación.

De igual forma que en SA, a SC también se le asocia un sistema de lagunaje artificial, pero difiere del primero en la forma y las especies utilizadas. No obstante, el efecto y finalidad del sistema de lagunaje es el mismo, reducir los niveles de NO₃⁻ y Na⁺ para poder ser vertido al medio sin producir efectos adversos severos.

4.3 Diseño de los sistemas de lagunaje artificial.

El diseño y el cálculo de la superficie necesaria de lixiviación (A), se llevó a cabo mediante la ecuación propuesta por Reed y col. (1995). Se utilizó un modelo cinético de flujo de tapón de primer orden basado en la eliminación de NO₃⁻.

La fórmula es la siguiente:

$$A = \frac{Q \cdot (\ln C_o - \ln C_e)}{Kt \cdot d \cdot n}$$

Donde A es el área (m²), Q es el caudal medio diario a depurar (m³/día), C_o la concentración de nitrógeno en forma de nitrato N-NO₃⁻ a la entrada del SLA (mg/L), C_e la concentración de N-NO₃⁻ a la salida del SLA (mg/L), d es la profundidad de la capa de agua (m), y n es la porosidad del sustrato utilizado (L L⁻¹) y Kt es la constante de velocidad dependiente de la temperatura y se estima según la siguiente ecuación:

$$Kt = 1,15^{(T-20)}$$

donde T es la temperatura media del mes más frío (Narváez y col, 2011).

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

4.4 SLA asociado al sistema de cultivo abierto.

En el Anejo III se dispone un esquema orientativo del SLA asociado a SA. Los componentes principales del SA son:

- Depósito de recogida de los drenajes procedentes del cultivo, con sensor de nivel integrado, y de capacidad de 500 L.
- Bomba de impulsión sumergida en el depósito de recogida de drenajes: KONA V750PM.
- Depósito de acetato de sodio (CH_3COONa).
- Inyector automático de acetato sódico: 10 LTS 1-5 BAR.
- Sistema de tuberías para riego.
- Caudalímetro.
- Ocho depósitos prefabricados de fibra de vidrio rellenos con grava silícea.
- Especies de plantas fitodepuradoras.

La superficie de depuración de este SLA está formada por ocho depósitos prefabricados que se disponen en serie, y apoyados en el suelo, cuyas dimensiones son 108 cm de largo y ancho, y 114 cm de altura. En el interior de estos se instaló un sistema de drenaje en la parte inferior mediante una tubería horizontal perforada, y a su vez se instaló un sistema basado en vasos comunicantes de forma que podamos controlar la altura de los lixiviados dentro de cada depósito manteniéndola en 60 cm. Posteriormente se ha rellenado con grava silícea de 8-12 mm de diámetro.

En cada depósito se plantó, una especie de planta fitodepuradora distinta. De esta forma, tenemos ocho especies distintas enumeradas según su depósito:

1. *Iris pseudacorus* (Lirio amarillo)
2. *Cyperus longus* (Juncia olorosa).
3. *Halimione portulacoides* (Verdolaga marina).
4. *Phragmites australis* (Carrizo).
5. *Juncus maritimus* (Junco marino).
6. *Scirpus holoschoenus* (Junco agrupado).
7. *Juncus effusus* (Junco fino).
8. *Typha domingensis* (Espadaña).

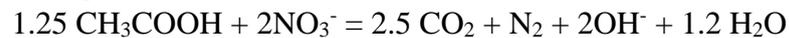
Una vez que se ha regado el cultivo en el invernadero, los drenajes son canalizados y recogidos por gravedad en el depósito de lixiviados. Este depósito, de 500 L de capacidad, tiene instalado en su interior un sensor de nivel (boya de nivel), que determinará el riego de nuestras plantas, es decir, controlará el nivel máximo de drenaje en el depósito, el cual una vez alcanzado activará el sistema de riego del SLA. Es decir, en el depósito de lixiviados se va recogiendo el drenaje del cultivo hasta que el nivel de este depósito alcanza el rango máximo de la boya. Una vez que se alcanza ese rango máximo, se activa el riego del SLA, y el depósito comienza a vaciarse. Cuando el nivel del depósito llega al rango mínimo de la boya, se detiene el riego del SLA. De esta forma, el riego de este SLA lo determinan siempre las condiciones de cultivo, es decir,

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

cuando más riego se produzca en el invernadero más drenaje se producirá, por lo que un mayor volumen de drenaje pasará por el SLA.

El sistema de tuberías de riego se dispone como en el anejo III, de forma que la presión con la que la solución de lixiviados llega a cada uno de los ocho depósitos sea similar. Cada depósito se regará mediante tres tubos de PE perforados. Estos tubos se encuentran sujetos en los bordes del depósito, de manera que quedan suspendidos encima de éste, permitiendo un riego homogéneo. La contabilización del volumen de agua que pasa por el SLA se lleva a cabo mediante un caudalímetro que se dispone al comienzo del sistema de tuberías.

Para facilitar el proceso de desnitrificación, es necesario la inyección de una fuente de carbono, la cual se APORTA mediante la instalación de un inyector automático, que inyecta acetato de sodio (CH_3COONa) en el sistema de riego de SLA, que se encuentra en un depósito auxiliar. El inyector se activa simultáneamente con el riego del SLA. La relación de inyección C:N- NO_3^- en mg, será de 3:1, y podrá ir variando en función de la respuesta de nuestras plantas. La inyección de acetato promueve el siguiente proceso de desnitrificación bacteriano:



Una vez que se produce el riego del SLA, los depósitos de las plantas alcanzan, o no, los 60 cm de altura de los lixiviados de su interior, de manera que produce el drenaje hacia el medio.

4.5 SLA asociado al sistema de cultivo cerrado.

En el Anejo IV se dispone un esquema orientativo del SLA asociado a SC.

Los componentes principales de este SLA son:

- Depósito de descartes de 2.000 L.
- Bomba de impulsión: Bomba EBARA ACERO/INOX JESX-8.
- Depósito de acetato de sodio de 50 L.
- Programador de riego.
- Inyector automático.
- Tres fosos impermeabilizados.
- Caudalímetros.
- Especies de plantas fitodepuradoras.

La superficie de depuración de este sistema está formada por tres fosos excavados en el suelo, que posteriormente han sido impermeabilizados con PE de alta densidad, y han sido rellenados con grava silíceo con una granulometría entre 8-12 mm de diámetro. Las dimensiones de los fosos son 2 m de largo, 1 m de ancho y 1 m de profundidad. Además, de la misma forma que los depósitos del SLA asociado a SA, disponen de un sistema de drenaje en su interior, mediante una tubería perforada, y

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

también otro sistema de vasos comunicantes para controlar el nivel de lixiviados dentro de los fosos, y mantenerlos a un nivel fijo de 60 cm de altura.

El riego del SLA fue programado, ya que el volumen diario de drenaje descartado varía en función de la necesidad de descarte. Las plantas utilizadas en los tres fosos son: *I. pseudoacorus*, *S. holoschoeus*, y *C. zizanioides*. Junto con la solución de nuestro depósito de lixiviados, se realizó un aporte de carbono para ayudar al proceso de desnitrificación bacteriano. Este aporte de carbono se realizó mediante un inyector, que aporta acetato sódico (CH_3COONa) contenido en un depósito auxiliar.

La distribución de las soluciones de riego en los fosos se llevó a cabo mediante dos tuberías perforadas que se colocaron sobre cada foso.

De la misma forma que en SA, una vez que se ha producido el riego de los fosos, estos alcanzan, o no, los 60 cm de lixiviados en su interior, de manera que drenan al medio la solución depurada, mediante un sistema de vasos comunicantes. La solución entrante en los fosos se comienza a depurar.

4.5.1 Sistemas de seguridad instalados en SLA asociado a SC.

El depósito de descartes dispone de varios sistemas de seguridad en forma de sensores, los cuales previenen tanto errores humanos, como fallos eléctricos. Podemos encontrarnos con dos situaciones críticas, un volumen excesivo en el depósito, que al encontrarse cerrado y a presión puede suponer un grave problema, o por contrario, un volumen deficitario que puede dañar la bomba de impulsión del riego del SLA, y que puede provocar un déficit hídrico en las plantas del SLA.

Para evitar un exceso de volumen en el depósito, en primer lugar, éste dispone de un aliviadero en la parte superior de la pared del depósito, que desagua directamente en el medio. Este aliviadero elimina la presión contenida en el depósito al ser una salida al exterior, y vierte el exceso de drenaje del depósito en caso de exceso.

Sin embargo, como el objetivo es evitar el vertido directo de los lixiviados al medio, se ha instalado en el depósito un sensor de nivel, situado a una altura un poco inferior del aliviadero, de forma que, ante la situación de un exceso de drenaje en el depósito, se evite la salida de este por el aliviadero. Es decir, dicho sensor realmente es una boya de nivel, la cual tiene un rango máximo, y un rango mínimo. Cuando el depósito se llena, la boya sube con el nivel del drenaje, y cuando dicho nivel llega al rango máximo de la boya, el programador de riego activa el riego del SLA y también se activa la inyección de acetato sódico. Una vez activado el riego, el nivel del depósito comienza a bajar, y con éste baja la boya, hasta que llega a su rango mínimo, donde desactiva el riego y la inyección de acetato.

Por tanto, siempre se priorizará el paso del drenaje por SLA antes de ser vertido al medio, por lo que se requerirá del uso del aliviadero en el caso de una avería que impida la impulsión de drenaje a SLA, o cuando el caudal de entrada de drenaje en el depósito sea superior al de salida.

Por otra parte, para evitar un volumen deficitario en el depósito, este cuenta con otro sensor de nivel, que se encuentra en la parte baja del depósito, que es el encargado

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

de evitar que el tanque se quede vacío, lo que acarrearía varios problemas, como la rotura de la bomba, así como la falta de solución de drenaje para riego de las especies del SLA. Este sensor de nivel también es una boya de nivel, cuenta con otro rango máximo y mínimo. El depósito se va vaciando conforme se riegan nuestros fosos, y en el momento en que el nivel de este se encuentra en el rango mínimo de nuestra boya, se activa el llenado del depósito con agua de la finca. El depósito tiene en su parte superior una entrada de agua de la finca en caso de emergencia, regulado por una electroválvula que está conectada por cable con el sensor de nivel. Cuando el sensor de nivel detecta que el nivel del depósito se encuentra en el rango mínimo, envía una señal a la electroválvula, que permite el paso de agua de la finca al depósito. Una vez activado el llenado del depósito, su nivel va ascendiendo, y cuando alcanza el rango máximo del sensor de nivel, envía una señal a la electroválvula para que cierre la entrada de agua.

4.6 Especies de plantas utilizadas en los SLA asociados a SA y SC.

Se han utilizado una serie de plantas procedentes de semillero con características específicas, muchas de las cuales conviven de forma natural en parques protegidos cercanos a nuestra zona, como puede ser Punta Entina, Cabo de Gata, la albufera de Adra, etc.

Cuando decimos que hemos seleccionado especies con características específicas nos referimos a su función y/o capacidad que tenga dicha especie de reducción del contenido en NO_3^- , o la reducción del contenido en Na^+ .

De esta manera, las especies que hemos utilizado en relación con su capacidad para la reducción de la concentración de NO_3^- son:

- *Iris pseudacorus* es una especie perteneciente a la familia *Iridaceae*, originaria de Europa, Asia occidental y del norte de África, que toma como nombre común “Lirio amarillo”. Es una planta herbácea perenne con rizomas robustos, con una altura que varía entre un metro, y un metro y medio. Sus hojas son erectas con dimensiones que pueden alcanzar los 3 cm de ancho y 90 cm de largo, y sus flores son de color amarillo. Crece en condiciones húmedas, y en zonas normalmente inundadas o cercanas a cauces de agua, ya que es tolerante a la inmersión en agua, así como a un bajo pH, y a los suelos anóxicos. Su propagación es muy rápida, tanto por semillas como por rizomas. Tiene un uso como planta medicinal, pero actualmente, su uso principal además de ornamental es ecológico en la purificación de aguas, ya que acumulan en sus tejidos metales pesados del agua y del suelo, y forma un medio idóneo para la proliferación de bacterias que producen la desnitrificación, reduciendo el contenido en NO_3^- .
- *Cyperus longus* es una especie perteneciente a la familia *Cyperaceae*, conocida comúnmente como juncia olorosa, se encuentra ampliamente distribuida en toda Europa y en el norte de África. Es una planta herbácea, perenne, con rizomas largos, y su tallo alcanza una altura máxima aproximada de 1,5 m. Las hojas son

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

alargadas de 1 cm de ancho. La floración se da desde abril hasta septiembre, y se produce en forma de inflorescencias. Habita en zonas húmedas preferentemente no salinas, en márgenes de ramblas, lagos, ríos, etc. Como uso destaca su capacidad fitodepuradora en la eliminación de metales pesados como Zn, Cd, Cu, Fe, y Mn (Ganjo y Mirza, 2013), así como la reducción del contenido en NO_3^- .

- *Phragmites australis* es una especie perteneciente a la familia *Poaceae*, comúnmente conocida como carrizo, y se encuentra extendida en toda Europa, así como en algunas regiones de África. Es una planta perenne y herbácea, con un gran rizoma leñoso, con un tallo alargado y flexible, y unas hojas verdes grisáceas envainadoras, de extremo alargado y agudo, que pueden llegar a los 50 cm de longitud. La planta puede alcanzar una altura de 4 m. La floración se puede dar desde junio hasta diciembre, en forma de panícula, y su fruto en forma de cariósido. Su hábitat principal son lugares húmedos, pero no salinos, como pueden ser ramblas, charcas, torrentes, canales, acequias, etc. Sin embargo, soportan bastante bien niveles moderados de salinidad en el agua y en el suelo, por lo que también podemos encontrarlo en zonas más salobres. Dentro de los usos y ventajas que se pueden obtener de esta especie, destacamos la reducción de la concentración de nitratos por el soporte microbiano que forma la planta, además de la eliminación de metales pesados. Sarafray y col. (2009), utilizan esta especie en un sistema de lagunaje artificial consiguiendo significantes reducciones de NO_3^- , Zn, y P.
- *Juncus maritimus* es una especie perteneciente a la familia *Juncaceae*, que se conoce de forma común como junco marino, y que se encuentra distribuida en el centro y este de Europa, en el norte de África, y en el oeste de Asia. Es una planta perenne que alcanza hasta 1,5 m de altura, caracterizada por un rizoma horizontal, unos tallos cilíndricos de hasta 1 m de largo, y unas hojas pardas muy parecidas al tallo y punzantes. Su floración se da de mayo a julio en forma de inflorescencia, y su fruto se da en cápsula. Su hábitat se compone de suelos completamente húmedos, incluido los salinos, como marismas, pantanos, saladares, etc. Entre las ventajas y usos que encontramos de esta especie, en relación a la fitodepuración, es la reducción de NO_3^- , así como la acumulación de metales pesados.
- *Scirpus holoschoenus* es una especie perteneciente a la familia *Cyperaceae*, conocida comúnmente como junco agrupado. Se encuentra distribuida en toda la región mediterránea, y se extiende por todo el centro de Europa, así como en el oeste de Asia. Es una planta herbácea y perenne con una altura de 1,5 m. Tiene rizomas con entrenudos cortos, tallos prácticamente cilíndricos que suponen casi toda la altura de la planta, y unas hojas que están reducidas a vainas basales de color pardo. Su floración comprende desde el mes de marzo hasta octubre, y se da en forma de inflorescencias formadas por glomérulos globosos. Su hábitat natural comprende zonas encharcadas o próximas a cursos de agua.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

El uso de esta especie para fitodepuración está en la absorción y reducción de metales pesados, y la reducción de NO_3^- .

- *Chrysopogon zizanioides* es una especie perteneciente a la familia *Poaceae*. Es conocida comúnmente como Vetiver. Es una planta perenne, que llega a alcanzar dos m de altura. La mayor parte de la altura la proporciona su tallo largo. Sus hojas con largas, delgadas y rígidas. Sus raíces crecen verticalmente en profundidad, alcanzando en ecosistemas naturales hasta 4 m. Su floración se produce en forma de panícula. Entre los usos del vetiver destacamos absorción de metales pesados como Pb y Hg, y la reducción de nitratos, en relación a su uso en el control de aguas residuales. Por otra parte, debido a su gran capacidad de enraizar en profundidad, es utilizado como lucha contra la erosión en muchos países asiáticos. Además, sus raíces se utilizan para la extracción de aceites esenciales en perfumería.
- *Juncus effusus* es una especie perteneciente a la familia *Juncaceae*, que se conoce de forma común como junco fino, distribuida mayormente en la costa mediterránea, así como en Gran Bretaña e Irlanda. Es una planta herbácea, perenne que alcanza 1-1,2 m de altura. Posee un rizoma horizontal muy ramificado, tallos verdes largo y cilíndricos y hojas basales sin limbo. Florece desde junio a septiembre en forma de inflorescencia. El hábitat de esta especie es similar al de las demás especies estudiadas, pudiendo encontrarlas en zonas encharcadas (pantanos), o en los bordes de cursos de agua (ríos, arroyos, acequias). Es usada en fitodepuración de aguas residuales en humedales artificiales.
- *Typha domingensis* es una especie que pertenece a la familia *Thyphaceae*, comúnmente conocida como espadaña, y se encuentra ampliamente extendida por todo el planeta, aunque son diferentes taxones. Es una planta acuática, perenne y rizomatosa, que puede alcanzar los tres metros de altura. Sus hojas son muy largas y de longitud variable. Su floración se produce de junio a noviembre en inflorescencia. Su hábitat principalmente son lugares húmedos no salinos, como las ramblas, cursos de agua, charcas, pantanos; pero también tolera condiciones subsalinas, e incluso los hábitats acuáticos contaminados. Destacamos su uso en la depuración de aguas residuales, así como acumulador de metales pesados. Además, su polen es utilizado como alimento suplementario de ácaros depredadores de plagas en hortícolas (Martín y Téllez, 2016)

Por otra parte, se ha evaluado una planta halófila para ver su capacidad para reducir la concentración de Na^+ :

- *Halimione portulacoides* es una especie de la familia *Amaranthaceae*, también conocida como verdolaga marina, cuya distribución se encuentra en la costa atlántica y mediterránea europea, así como en la costa sur de África. Es una planta arbustiva de hasta 1,5 m de altura, cuyas hojas se disponen de forma opuesta. Su floración se produce entre agosto y noviembre, y sus flores formar

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

una inflorescencia en panícula. Su hábitat comprende terrenos con suelos salinos y encharcados del litoral, como marismas y saladares. Su uso se da en revegetación de ecosistemas costeros, así como en recuperación de suelos contaminados por metales pesados.

4.7 Determinaciones del balance hídrico: efluente de entrada y de salida.

Para llevar a cabo la cuantificación del volumen de drenaje depurado, tanto diario como semanal, se instaló un caudalímetro a la salida de los lixiviados a depurar hacia los SLA. La lectura de estos caudalímetros se recogía una vez a la semana. En SLA asociado a SC, semanalmente se recogía la lectura del caudalímetro (15. Caudalímetro 3, Anexo IV) al inicio y al final del riego del SLA. Con las lecturas de inicio y final se determinó el volumen de lixiviado a depurar en un riego; con las lecturas de dos semanas sucesivas se determinó el volumen de lixiviado que se depuraba semanalmente.

En el SLA asociado a SA se dispone de un caudalímetro el cual registra el volumen diario de drenaje que sale del cultivo y va directamente a los 8 depósitos que configuran el SLA, está situado en el sistema de tuberías que impulsan el drenaje junto con el aporte de carbono, desde el depósito colector hacia los depósitos de las plantas. Se recogen datos una vez a la semana, en primer lugar, la lectura del caudalímetro antes de riego de SLA, y en segundo lugar la lectura de este mismo después de riego de SLA. Realizando la diferencia entre la lectura después de riego y la lectura antes de riego obtendremos el volumen de drenaje que riega el SLA en cada riego del cultivo de tomate. Si se aplica la diferencia entre la lectura del caudalímetro, antes de regar SLA, de una semana menos la de la anterior obtenemos el caudal semanal de drenaje que es depurado en SLA, y dividiendo este valor entre 7 días obtendremos una estimación del caudal diario.

4.8 Determinación del contenido en NO_3^- y Na^+ .

En el trabajo se realizó una determinación semanal del contenido de nitratos del lixiviado a depurar y a la salida del SLA de cada uno de los 8 depósitos en el sistema asociado al SA y de los tres fosos en el asociado al SC. Así mismo se determinó el contenido de sodio a la entrada y la salida del depósito que contenía las plantas de *H. portulacoides* en SLA asociado a SA, para determinar su capacidad de absorción de sodio. Las muestras de entrada se recogían colocando un recipiente en la zona de riego de las plantas, y las de salida se recogían de los drenajes de cada depósito y foso de las plantas.

Una vez que se tienen todas las muestras, se analiza contenido de nitratos y sodio (Na^+) con los medidores LAQUA-Twin de HORIBA. Hay un medidor LAQUA-Twin específico para NO_3^- , y otro para Na^+ . El valor de la medición con LAQUA-Twin lo aporta en partes por millón (ppm). A su vez se mide la conductividad eléctrica y pH de cada una de las muestras.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Cabe destacar la importancia que tiene realizar el análisis de las muestras el mismo día de su recogida, para que no varíe considerablemente su contenido de NO_3^- ya que, al ir disuelto el carbono, el proceso de desnitrificación puede continuar en el tiempo, debido a las colonias de bacterias heterótrofas, por lo que en las muestras que se cogen de cada planta siguen conteniendo esas bacterias. El proceso de desnitrificación continúa en los recipientes de las muestras, reduciéndose el contenido en NO_3^- en estos, por lo que, si no realizamos el análisis lo antes posible, y sobre todo el mismo día de la recogida de muestras, podemos obtener datos alejados de la realidad.

4.9 Seguimiento del desarrollo de las plantas en el SLA asociado a SA.

Se realizó un seguimiento del crecimiento y del desarrollo de las 8 plantas, que componen el SLA de SA, ya que se plantaron el día 22 de febrero de 2021, por lo que al realizar un seguimiento de su desarrollo durante el periodo en el que se realizó la toma de datos, se puede observar el tiempo en que comienza el efecto depurador de cada planta a medida que estas crecen.

Se tomaron las medidas de la altura de las plantas el día de la plantación, un mes después de la plantación, y también en los últimos días de la toma de datos. Además, se realizó una foto semanal de cada planta que compone el SLA asociado a SA, el mismo día que se toman las muestras. De esta manera, realizando la foto desde una posición aproximadamente similar, se puede observar claramente el crecimiento.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

5 Documentación gráfica del ensayo.



Imagen 4. Cultivo de tomate Cherry en invernadero “Biogreen”.



Imagen 5. SLA asociado a SA (Sistema abierto en invernadero “Biogreen”) desde el frente (31/05/2021).

En la imagen 5 se dispone el SLA asociado a SA. Podemos observar de izquierda a derecha: el depósito de acetato sódico (debajo de la caseta), el inyector de acetato (debajo de la caseta y bajo el plástico), el depósito de lixiviados, y los depósitos de las plantas, con sus sistemas de vasos comunicantes, que suponen la superficie de depuración. De izquierda a derecha los depósitos contienen: *I. pseudacorus*, *C. longus*, *H. portulacoides*, *P. australis*, *J. maritimus*, *S. holoschoenus*, *J. effusus*, y *T. domingensis* respectivamente. Cuando el drenaje de SLA sale por el sistema de vasos comunicantes, se canaliza al medio por la canaleta blanca de la parte inferior de la imagen 5.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.



Imagen 6. SLA asociado a SA visto desde arriba (15/04/2021).

En la imagen 6 se observa claramente como se disponen las tuberías de riego perforadas apoyadas en los depósitos.



Imagen 7. SLA asociado a SC (Sistema cerrado en invernadero "C8").

De izquierda a derecha en la imagen 7 observamos a *C. zizanioides*, *S. holoschoenus*, e *I. pseudacorus*.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.



Imagen 8. Construcción SLA asociado a SC: antes.



Imagen 9. Construcción fosos SLA asociado a SC

En la imagen 9 se puede observar la construcción con ladrillo de los fosos, así como su impermeabilización con PE, y su posterior relleno con grava.



Imagen 10. SLA asociado a SC.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

En la imagen 10 se puede ver el sistema de vasos comunicantes (debajo de la línea roja de la derecha), que mantiene el nivel del agua en el foso hasta 60 cm (línea roja derecha). También se puede ver la salida del drenaje de cada uno de los fosos a la izquierda (línea roja de la izquierda), donde se recogía la muestra de cada uno para analizar.



Imagen 11. Depósito de descartes en SLA asociado a SC.

En la imagen 11 se puede observar el aliviadero en la parte izquierda del depósito de descartes en azul, y encima de este a la izquierda se ve el tubo de entrada de lixiviados al depósito azul. Además, se encuentra en la imagen el depósito de acetato sódico a la derecha del depósito de descartes, en el suelo, y en la pared se encuentra el inyector de acetato sódico.

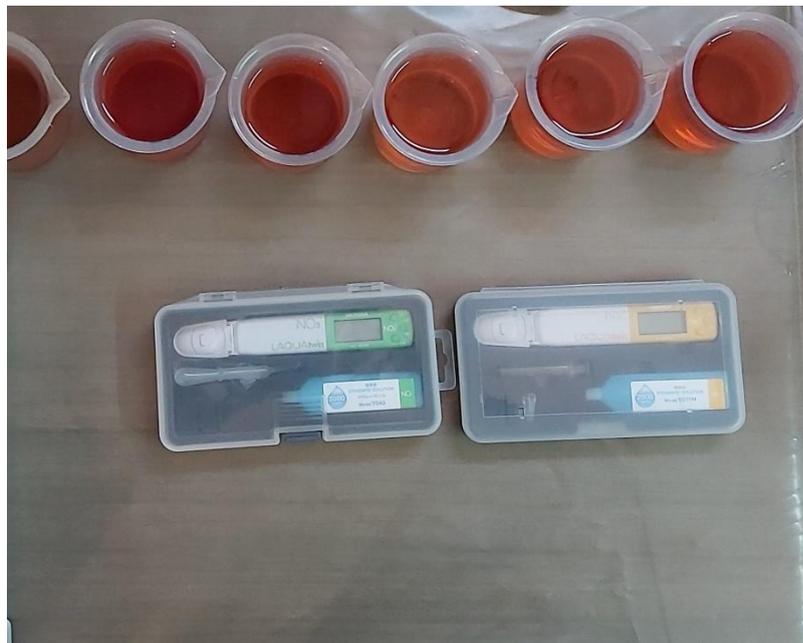


Imagen 12. Análisis con medidores LAQUA-Twin.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

En la imagen 12 se muestran los dos medidores LAQUA-Twin, de NO_3^- a la izquierda, y el Na^+ a la derecha. En la parte de arriba de la imagen vemos las muestras tomadas en el SLA.

6 Resultados y discusión

6.1 Seguimiento del desarrollo de las plantas en el SLA asociado a SA.

En las figuras 4 y 5 se presenta la longitud de las plantas que componen el SLA asociado a SA en tres fechas diferentes. Destaca *Typha domingensis* que presenta un crecimiento exponencial, alcanzando los 230 cm de altura en la última medida, seguida de *I. pseudacorus* con 110 cm. Las plantas que menor altura han alcanzado han sido *J. maritimus* y *H. portulacoides* cuyo porte es de tipo rastrero.

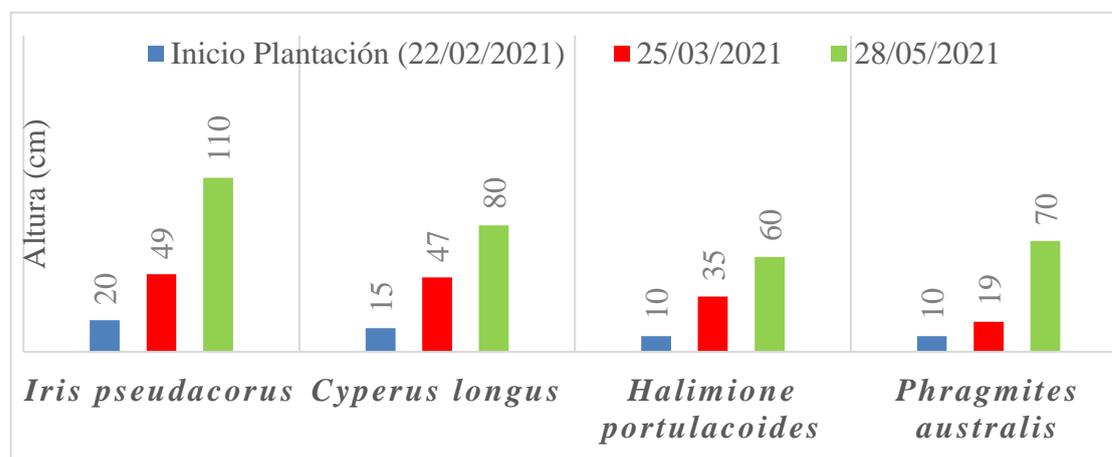


Figura 4. Evolución de la altura de las plantas (1).

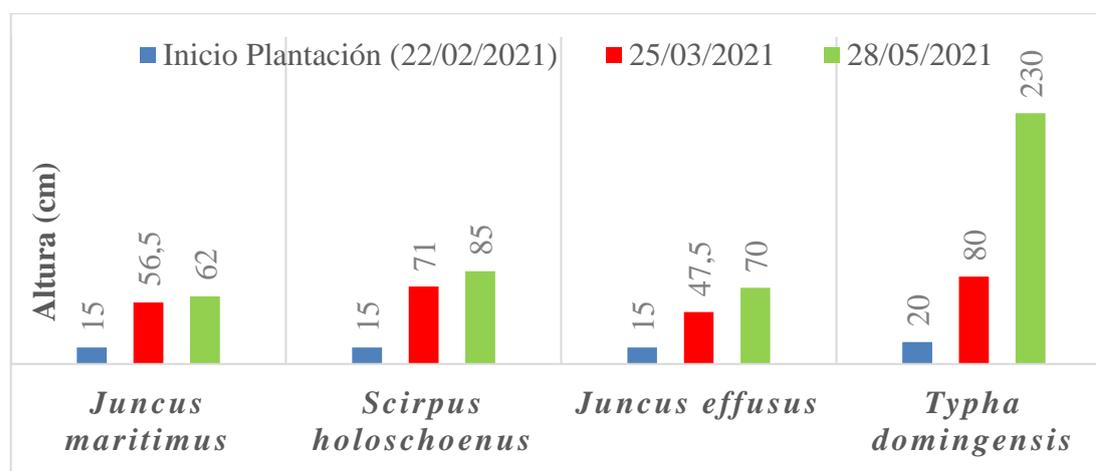


Figura 5. Evolución de la altura de las plantas (2).

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

En las siguientes imágenes (13-20) se muestran las imágenes tomadas el día de la plantación de las especies (22/02/2021), en comparación con las fotos de las plantas tres meses después (28/05/2021) de las distintas especies estudiadas.



Imagen 13. I. pseudacorus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.



Imagen 14. C. longus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.



Imagen 15. H. portulacoides día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.



Imagen 16. P. australis día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.



Imagen 17. J. maritimus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.



Imagen 18. S. holoschoenus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.



Imagen 19. J. effusus día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.

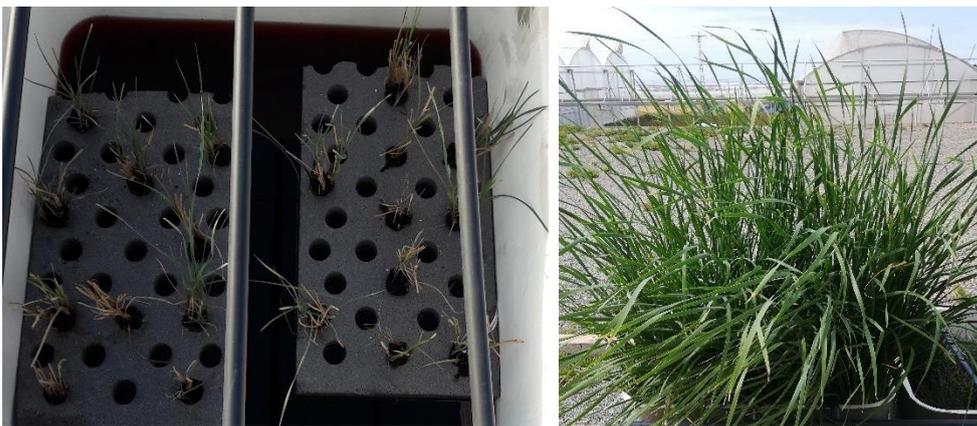


Imagen 20. T. domingensis día 22/02/2021 frente a día 28/02/2021.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

6.2 Evaluación de la capacidad de eliminar NO_3^- en los SLA asociados a SA y SC.

6.2.1 Resultados en SLA asociado a SC.

Las medidas que se tomaron durante la realización del trabajo se exponen en la figura 6. El efluente de entrada del SLA (color azul en la figura 6) tomó un valor de 1100 ppm de concentración de nitratos en el primer día de la toma de muestras, y experimentó un cierto descenso hasta el último día de toma de muestras con un valor de 710 ppm.

En cuanto a *Scirpus holoschoenus*, muestra un claro descenso a lo largo del tiempo en la concentración de NO_3^- de la solución, de manera que su depuración ha ido mejorando. Toma un valor inicial el día 8 de marzo de 730 ppm, y en el último día de toma de muestras, es decir, el día 31 de mayo obtiene 110 ppm de nitrato.

Iris pseudacorus y *Chrysopogon zizanioides* se mantienen prácticamente estables en el tiempo, obteniendo concentraciones de NO_3^- bajas, en comparación con la muestra de entrada, tanto al inicio de la toma de muestras como en el final: 180 ppm y 270 ppm respectivamente el día 8 de marzo, y 93 ppm y 98 ppm respectivamente el día 31 de mayo.

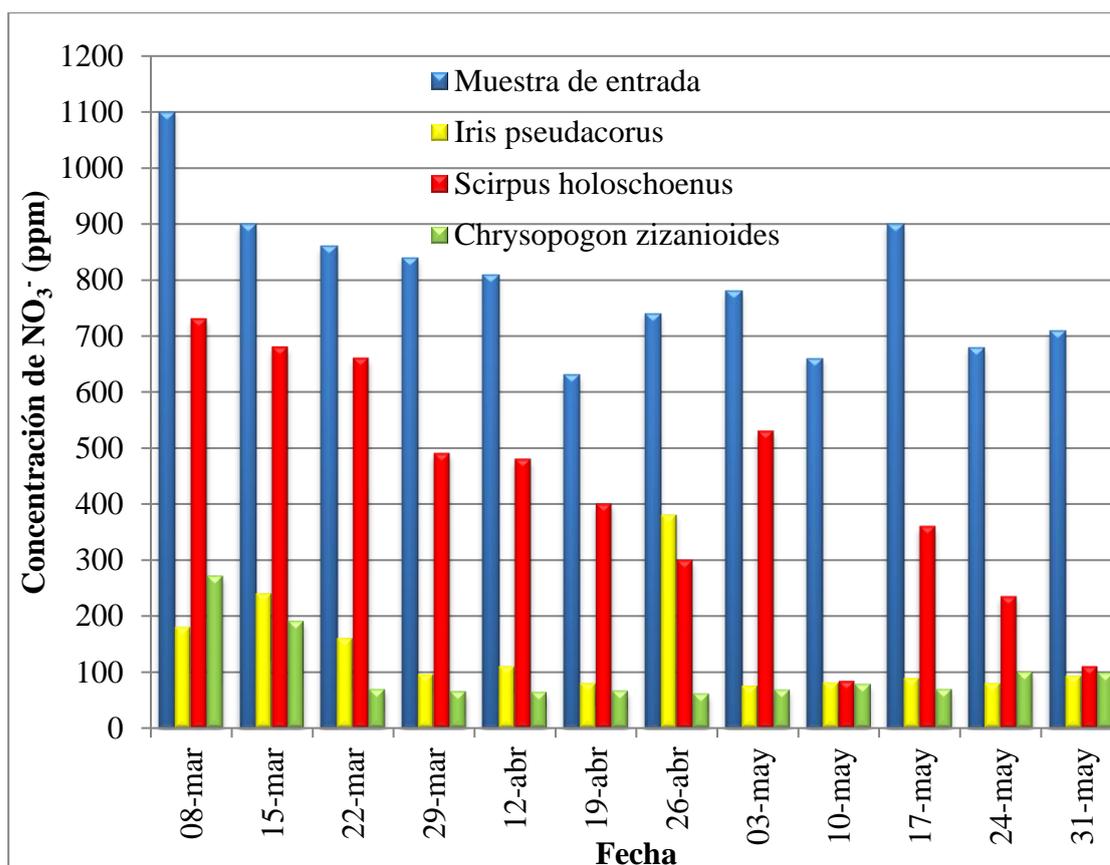


Figura 6. Evolución del contenido en nitratos del efluente de entrada y de las plantas.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Por otra parte, en la tabla 1 se muestran los porcentajes de reducción de NO_3^- de las plantas que componen el SLA. Este porcentaje se obtiene relacionando la concentración de la muestra de entrada con las concentraciones de las muestras de salida.

Se observa la tendencia al alza de *S. holoschoenus*, en cuanto a la reducción del contenido de NO_3^- , que empieza reduciendo un 33% el primer día de muestreo, y acaba el último día con un 85%. También se puede decir que *S. holoschoenus* ha sido la planta que menos ha reducido el contenido de NO_3^- , aunque haya ido en aumento.

En cuanto a *I. pseudacorus* y *C. zizanioides*, ya se había observado su estabilidad en la figura 6, la cual se corrobora en la tabla 1. *I. pseudacorus* se estabiliza entre un 80% y 90% de reducción de NO_3^- , y *C. zizanioides* se estabiliza en un 90%.

Fecha	% reducción NO_3^-		
	<i>Iris pseudacorus</i>	<i>Scirpus holoschoenus</i>	<i>Chrysopogon zizanioides</i>
08-mar-21	83,64	33,64	75,45
15-mar-21	73,33	24,44	78,89
22-mar-21	81,40	23,26	91,98
29-mar-21	88,57	41,67	92,26
12-abr-21	86,42	40,74	92,10
19-abr-21	87,30	36,51	89,52
26-abr-21	48,65	59,46	91,76
03-may-21	90,38	32,05	91,28
10-may-21	87,73	87,27	88,18
17-may-21	90,11	60,00	92,33
24-may-21	88,24	65,44	85,29
31-may-21	86,90	84,51	86,20

Tabla 1. Porcentajes de reducción del contenido de nitratos.

En la figura 7, se presenta la evolución en el tiempo de la capacidad de reducción de NO_3^- (%) de las tres plantas. Según el análisis estadístico presentado en el Anejo II, no hay una correlación entre la reducción de NO_3^- y el tiempo (DJ=día juliano) para el caso de *I. pseudacorus* y *C. zizanioides* (Vetiver). Sin embargo, *S. holoschoenus* si presenta una alta correlación significativa ($p < 0,05$) de su capacidad de reducción ($\text{CR}_{\text{NO}_3^-}$) (%) a lo largo del tiempo (DJ), presentando un coeficiente de determinación R^2 ajustado de 0,63, y presentando la siguiente ecuación del modelo ajustado:

$$\text{CR}_{\text{NO}_3^-} \text{ } S. \text{ holoschoenus} = -19,33 + 0,63 * \text{DJ}$$

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

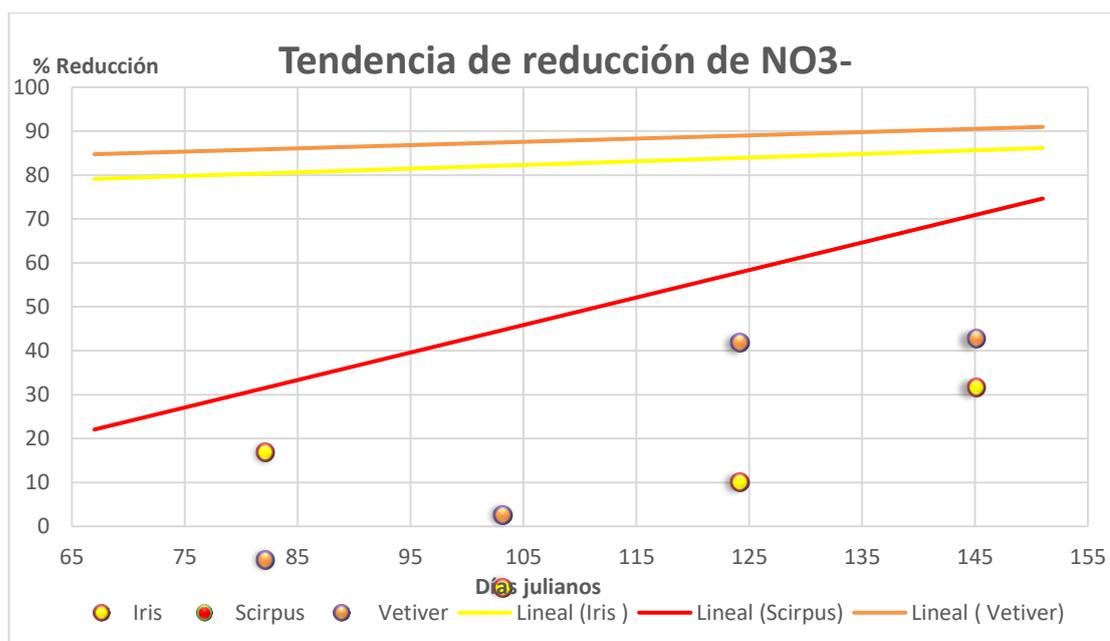


Figura 7. Tendencia de reducción de nitratos según el día juliano.

Por otro lado, se estudió la existencia de correlación entre la reducción de NO₃⁻ y las variables climáticas humedad relativa media (HR), temperatura media (T) e integral de radiación media diaria (IR), así como, el caudal semanal (Q) que se presenta en el Anejo II. Las variables climáticas que se han obtenido de la estación meteorológica del centro IFAPA La Mojonera, y se exponen junto con el caudal semanal en la tabla 2.

Fecha	Día juliano (DJ)	Integral de radiación media diaria (MJ/m ² día)	T ^e media (°C)	HR media (%)	Caudal semanal
08-mar-21	67	11,21	14,41	71,49	
15-mar-21	74	17,48	13,70	78,20	815
22-mar-21	81	18,96	13,34	58,68	678
29-mar-21	88	20,60	15,13	71,80	658
12-abr-21	102	20,27	17,00	68,89	1321
19-abr-21	109	15,35	14,63	79,98	1155
26-abr-21	116	19,09	17,21	74,39	1220
03-may-21	123	19,85	16,90	69,88	1121
10-may-21	130	22,61	19,26	63,88	1341
17-may-21	137	25,50	19,30	64,54	1430
24-may-21	144	21,59	19,58	76,34	1737
31-may-21	151	21,26	19,76	69,29	1640

Tabla 2. Variables utilizadas en el análisis estadístico de SLA asociado a SC en el Anejo II.

Los resultados obtenidos de este estudio estadístico fueron los siguientes:

- La reducción del contenido de NO₃⁻ en *I. pseudacorus* y *C. zizanioides* no presentó ninguna relación significativa con ninguna de las variables estudiadas.
- *S. holoschoenus* presenta una relación lineal significativa ($p < 0,05$) entre la capacidad de reducción de NO₃⁻ (CR_{NO₃⁻}) y la temperatura media (T), con un

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

coeficiente de determinación R^2 ajustado de 0,77, cuya ecuación del modelo se expone a continuación:

$$CR_{NO_3^-} - S. holoschoenus = -85,85 + 8,09 * T$$

6.2.2 Resultados en SLA asociado a SA.

Las medidas que se tomaron en SLA asociado a SA se muestran en la figura 8 y en la figura 9. En dichas figuras se observa un valor máximo de la muestra de entrada o efluente de entrada, el día 31 de marzo de 970 ppm; y un mínimo de 480 el día 13 de mayo. *I. pseudacorus*, *H. portulacoides*, *P. australis* y *T. domingensis* presentan una progresión descendente de la concentración de NO_3^- en la figura 8. Presentan estas cuatro especies su valor máximo de concentración de NO_3^- el día 25 de marzo con 590 ppm, 570 ppm, 620 ppm, y 600 ppm respectivamente. El día 6 de mayo también presentan todas ellas su concentración mínima, con 60 ppm, 63 ppm, 54 ppm, y 58 ppm respectivamente.

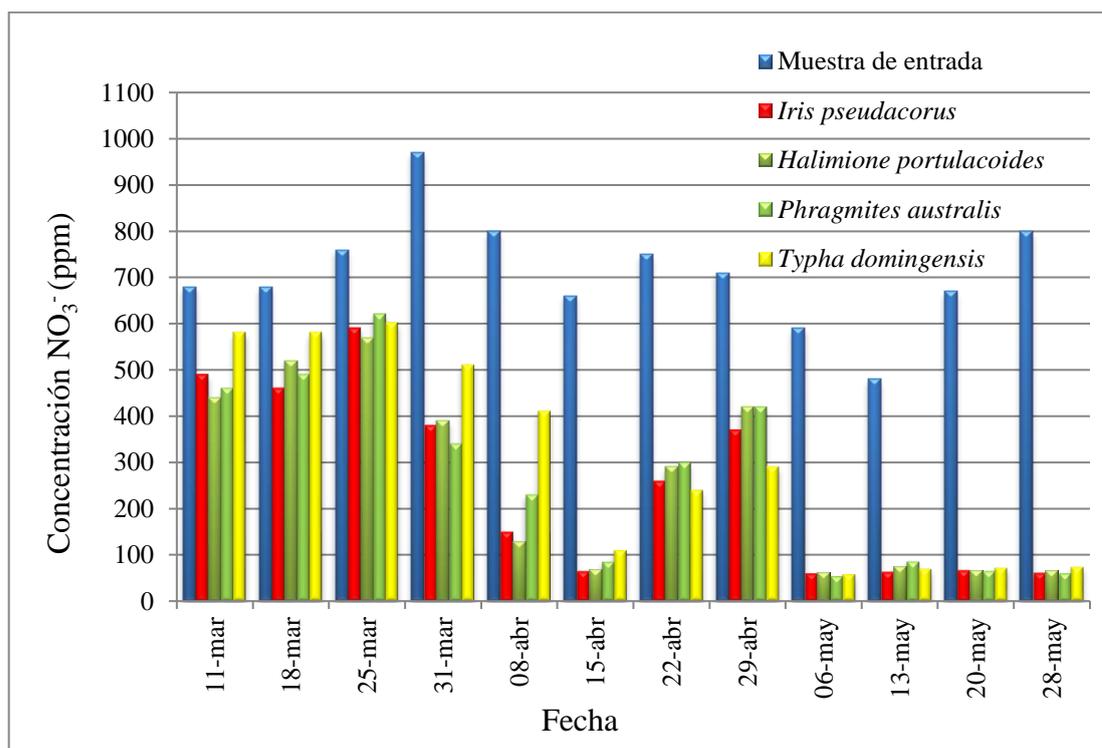


Figura 8. Evolución de la concentración de nitratos de *I. pseudacorus*, *H. portulacoides*, *P. australis*, y *T. domingensis*.

En la figura 9 ocurre algo similar que en la figura 8, *C. longus*, *J. maritimus*, *S. holoschoenus*, y *J. effusus* presentan una progresión descendente con el tiempo, en cuanto a su concentración de NO_3^- . Alcanzan su máxima concentración el día 25 de marzo con 590 ppm, 590 ppm, 640 ppm, y 650 ppm respectivamente. Así mismo la

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

concentración mínima que se registra en la toma de muestras corresponde con el día 6 de mayo, con 62 ppm, 54 ppm, 56 ppm, y 60 ppm respectivamente.

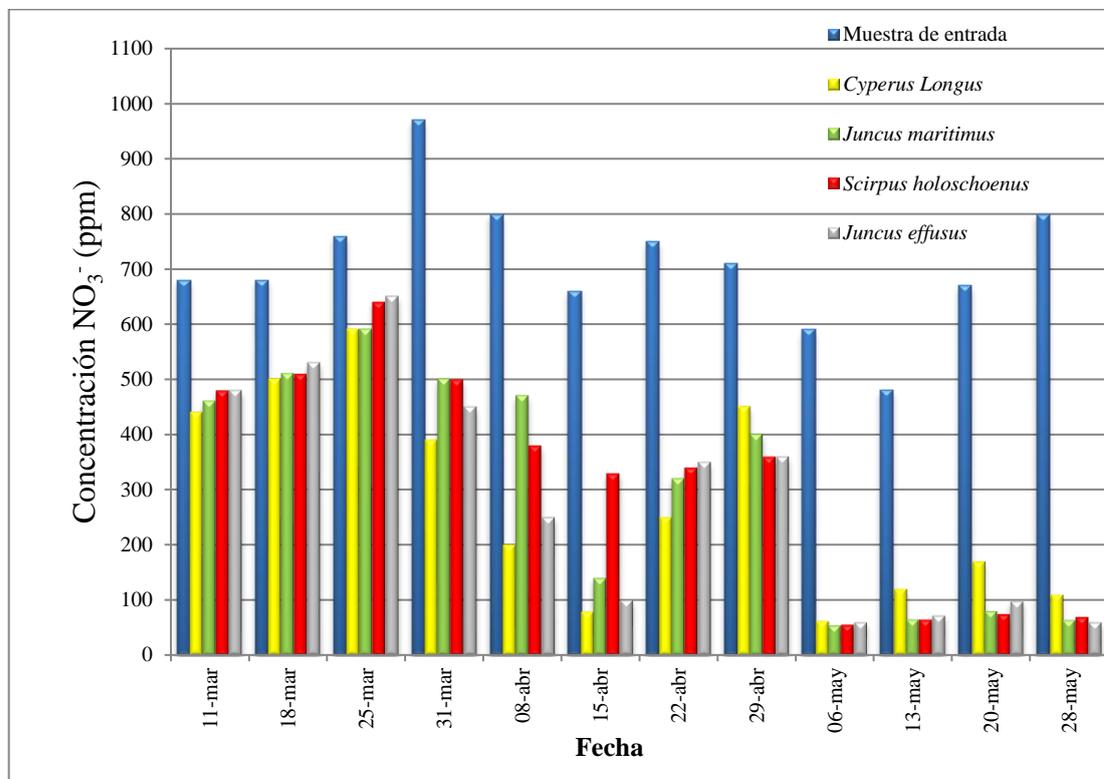


Figura 9. Evolución de la concentración de NO_3^- de *C. longus*, *J. maritimus*, *S. holoschoenus*, y *J. effusus*.

Se obtiene de la misma forma que en el apartado anterior, el porcentaje de reducción de nitrato de cada una de las especies en la tabla 3, relacionando la concentración de la muestra de entrada con las concentraciones de las 8 plantas. Todas las plantas experimentan un aumento de su poder de reducción de la concentración de NO_3^- con el tiempo. Esto se debe en el caso de este SLA, a que fueron plantadas de semillero el día 22 de febrero, por lo que conforme fueron creciendo su efecto era mayor. Se puede ver en la tabla como al principio del periodo de toma de muestras el porcentaje de reducción de casi todas las plantas se encontraba entre el 20-30%. Las plantas se desarrollaron en el tiempo, y en la última toma de muestras, el día 28 de mayo se ve como todas ellas se encuentran en un porcentaje de reducción en torno al 90%.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Fecha	% Reducción de NO ₃							
	<i>Iris pseudacorus</i>	<i>Cyperus Longus</i>	<i>Halimione portulacoides</i>	<i>Phragmites australis</i>	<i>Juncus maritimus</i>	<i>Scirpus holoschoenus</i>	<i>Juncus effusus</i>	<i>Typha domingensis</i>
11-mar-21	27,94	35,29	35,29	32,35	32,35	29,41	29,41	14,71
18-mar-21	32,35	26,47	23,53	27,94	25,00	25,00	22,06	14,71
25-mar-21	22,37	22,37	25,00	18,42	22,37	15,79	14,47	21,05
31-mar-21	60,82	59,79	59,79	64,95	48,45	48,45	53,61	47,42
08-abr-21	81,25	75,00	83,75	71,25	41,25	52,50	68,75	48,75
15-abr-21	90,15	88,03	89,70	87,12	78,79	50,00	84,85	83,33
22-abr-21	65,33	66,67	61,33	60,00	57,33	54,67	53,33	68,00
29-abr-21	47,89	36,62	40,85	40,85	43,66	49,30	49,30	59,15
06-may-21	89,83	89,49	89,32	90,85	90,85	90,51	89,83	90,17
13-may-21	86,67	75,00	84,17	82,08	86,46	86,46	85,00	85,42
20-may-21	90,00	74,63	90,00	90,30	88,06	88,81	85,37	89,25
28-may-21	92,25	86,25	91,75	92,50	92,00	91,25	92,50	90,75

Tabla 3. Porcentajes de reducción del contenido de NO₃⁻.

En la figura 10 y figura 11 se presenta la evolución en el tiempo de la capacidad de reducción de nitratos (%) de las ocho plantas. Se ha utilizado dicha gráfica con sus rectas de regresión en el análisis estadístico del Anejo II, cuyo resultado nos dice que existe una relación significativa ($p < 0,05$) entre la reducción de NO₃⁻ (CR_{NO₃⁻}) y el tiempo (DJ) para las 8 especies que componen el SLA asociado a SA.

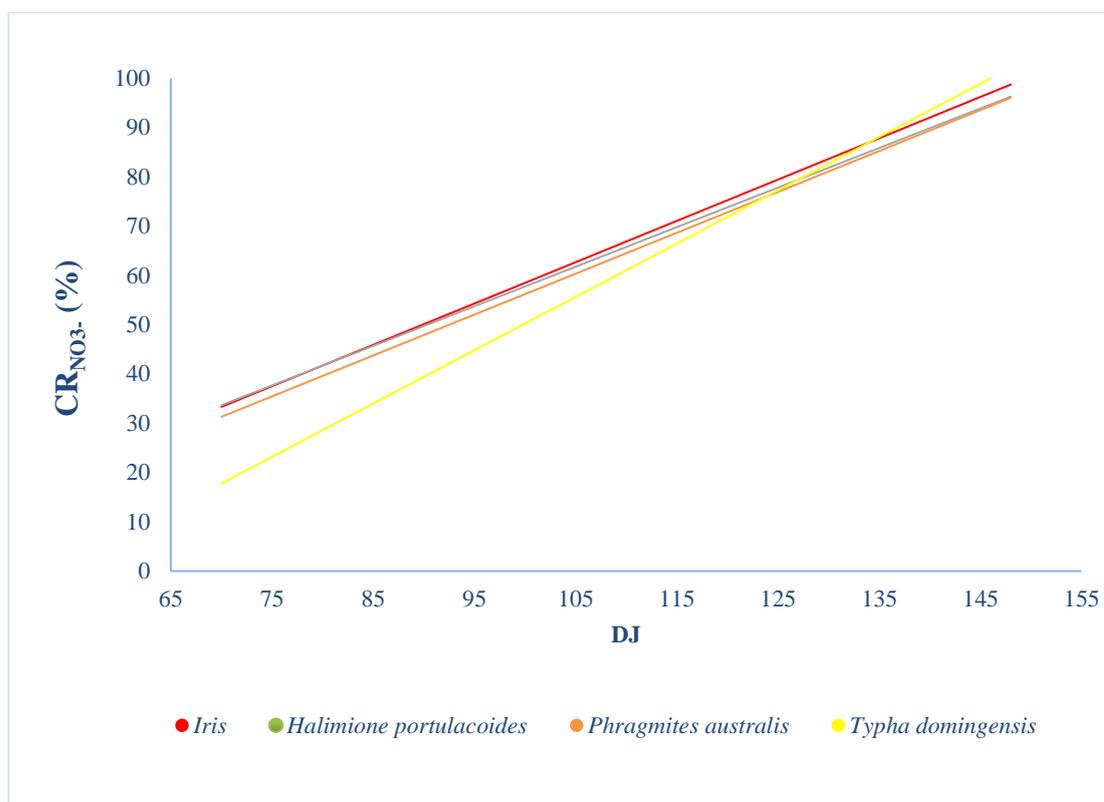


Figura 10. Tendencia de reducción de nitratos frente a los días julianos (1).

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

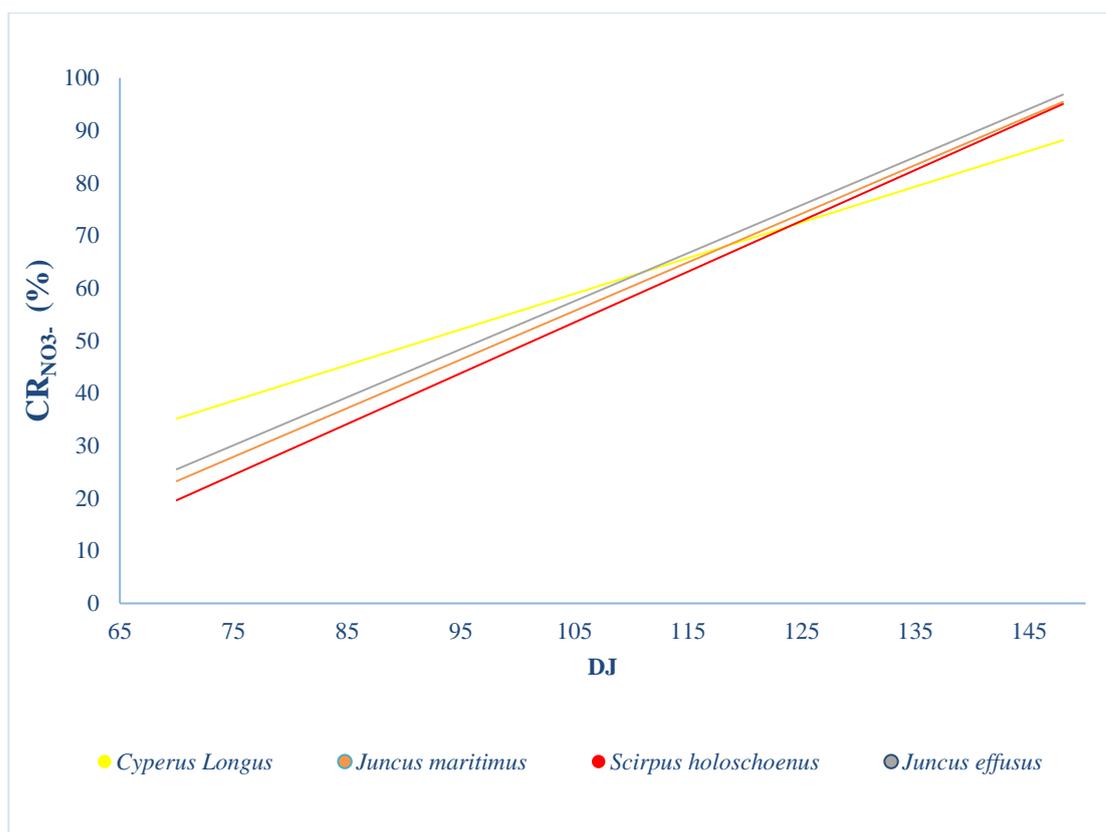


Figura 11. Tendencia de reducción de nitratos frente a los días julianos (2).

Por otro lado, y al igual que se hizo del ensayo anterior, se llevó a cabo un análisis estadístico multicriterio (Anejo II), donde se estudió si había una relación significativa entre la reducción de NO_3^- , y las variables climáticas: temperatura media (T), humedad relativa (HR) e integral de radiación media diaria (IR), así como con el caudal semanal (Q). Las variables meteorológicas proceden de la estación meteorológica del centro IFAPA de La Mojonera, y se exponen en la tabla 4 junto con la variable Q.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Fecha	Día juliano (DJ)	Integral media diaria de radiación (MJ/m ² día)	T ^ª media (°C)	HR media (%)	Caudal semanal (L)
11/03/2021	70	13,38	13,40	76,26	
18/03/2021	77	19,74	14,61	68,20	6479
25/03/2021	84	19,04	13,09	67,68	5442
31/03/2021	90	19,27	17,44	61,46	5509
08/04/2021	98	20,73	16,91	68,56	7940
15/04/2021	105	17,38	15,00	80,10	7195
22/04/2021	112	15,63	15,20	82,44	5794
29/04/2021	119	18,68	17,44	73,44	5200
06/05/2021	126	21,09	17,01	67,81	4384
13/05/2021	133	25,14	19,51	60,65	7970
20/05/2021	140	24,41	20,19	70,80	1163
28/05/2021	148	20,93	19,14	73,33	1069

Tabla 4. Variables utilizadas en el análisis estadístico de SLA asociado a SA en Anejo

En base a los datos que se han obtenido en la tabla 4, una vez realizado el estudio estadístico, se obtuvieron los siguientes resultados:

- El efecto de la reducción de la concentración de NO₃⁻ de *C. longus*, *H. portulacoides*, *P. australis* y *J. maritimus*, no tiene relación estadística con ninguna de las variables.
- *I. pseudacorus* y *J. effusus* han mostrado una relación lineal significativa (p<0,05) entre la reducción de NO₃⁻ con la integral de radiación media diaria y con la humedad relativa media. Presentando un coeficiente de determinación R² ajustado de 0,67 y 0,70 respectivamente. Las ecuaciones del modelo son las siguientes:

$$CR_{NO_3-I. pseudacorus} = -420,66 + 8,78*IR + 4,35*HR$$

$$CR_{NO_3-J. effusus} = -447,50 + 9,85*IR + 4,35*HR$$

- La reducción del contenido de NO₃⁻ de *S. holoschoenus* presenta una relación lineal significativa (p<0,05) con las variables caudal semanal, integral de radiación media diaria, y con la humedad relativa media. Presenta un coeficiente de determinación R² ajustado de 0,90, y la ecuación es la siguiente:

$$CR_{NO_3-S. holoschoenus} = -380,60 - 0,004*Q + 10,38*IR + 3,54*HR.$$

- El efecto de la reducción de la concentración de NO₃⁻ de *T. domingensis* presentó una relación lineal significativa (p<0,05) con la temperatura media, y con la humedad relativa media. El coeficiente de determinación R² ajustado fue de 0,73, y la ecuación es la siguiente:

$$CR_{NO_3-T. domingensis} = -312,66 + 11,65*T + 2,45*HR$$

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

6.3 Evaluación de la capacidad de eliminación de sodio en el SLA asociado a SA

Como ya se había comentado, en este trabajo también se evaluó la capacidad de reducción del contenido de Na^+ . *H. portulacoides* que es la única especie que presenta esta capacidad.

En la figura 12 se muestra la evolución de la concentración de sodio, en la muestra de entrada y en el depósito de *H. portulacoides*. Se observa unos datos muy igualados, consiguiendo en pocas ocasiones *Halimione portulacoides* tener una concentración por debajo de la muestra de entrada.

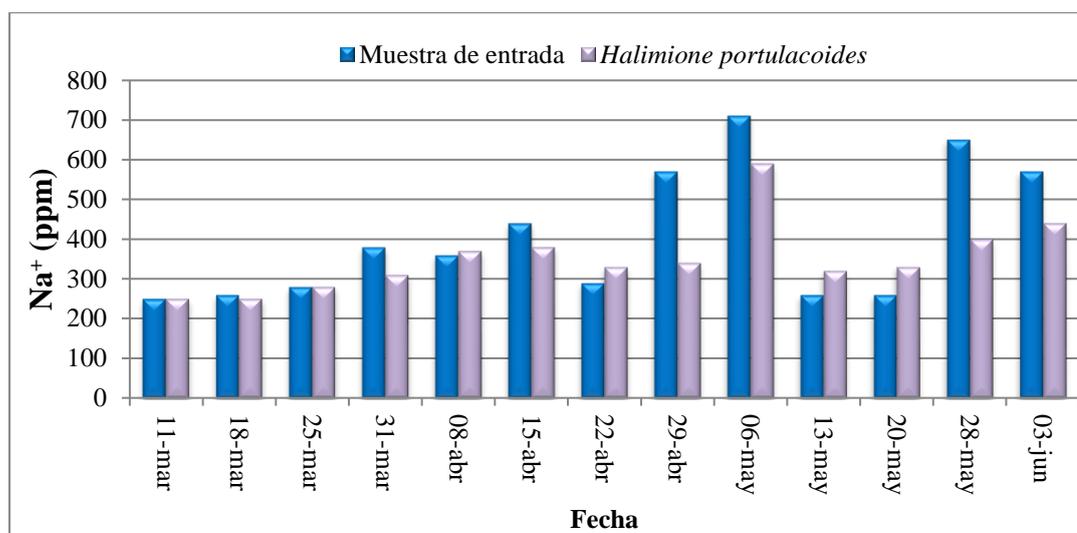


Figura 12. Evolución de la concentración de sodio.

En este caso de *H. portulacoides*, como se puede ver en la tabla 5, no se obtienen resultados demasiado definidos, ya que en ocasiones la concentración de Na^+ de la solución de salida de la planta es mayor que el de la solución de entrada. Esto es debido a que la planta se encontraba en fase de desarrollo. De hecho, se tomó una muestra más el día 3 de junio ya que se observaba una tendencia positiva de la planta, encontrando un 22% de reducción del contenido de Na^+ esa semana y casi un 40 % la anterior.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Fecha	% Reducción Na Halimione portulacoides
11-mar-21	0,00
18-mar-21	3,85
25-mar-21	0,00
31-mar-21	18,42
08-abr-21	-2,78
15-abr-21	13,64
22-abr-21	-13,79
29-abr-21	40,35
06-may-21	16,90
13-may-21	-23,08
20-may-21	-26,92
28-may-21	38,46
03-jun-21	22,81

Tabla 5. Porcentajes de reducción de la concentración de sodio cada día de toma de muestra.

6.4 Evaluación del volumen de lixiviados a depurar en ambos sistemas.

6.4.1 Volumen depurado en SLA asociado a SA.

En la figura 13, se puede observar la comparativa entre el volumen semanal y el volumen diario que ha depurado en el SLA asociado a SA, medido por los caudalímetros. Se observa que el caudal semanal se mantiene aproximadamente entre 5.500 y 6.500 L, y el caudal diario en torno a 900 y 1.000 L. Sin embargo, los últimos 2 caudales diarios y semanales experimentan una caída brusca. Esto puede ser debido a que terminó el ciclo de cultivo en el invernadero “Biogreen”, que es el que aportaba el drenaje a este SLA, por lo que ya se regaba en menor cantidad. Se pasó a regar con solución nutritiva los sacos de perlita sin cultivo, produciéndose un drenaje con NO_3^- que llegase al SLA, pero solo se daba 1 riego al día, lo que explica los caudales semanales y diarios tan bajos los días 20 y 28 de mayo.

Si se realiza la suma de todos los caudales semanales obtenidos, es decir los de la figura 13, obtenemos el volumen total depurado por el SLA asociado a SA, y lo que es lo mismo, el volumen de lixiviados que se generan por el cultivo de tomate tipo cherry en sustrato de fibra de coco bajo un invernadero multicapilla de 896 m² en 79 días.

Realizando dicha suma, obtenemos 58.145 L.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

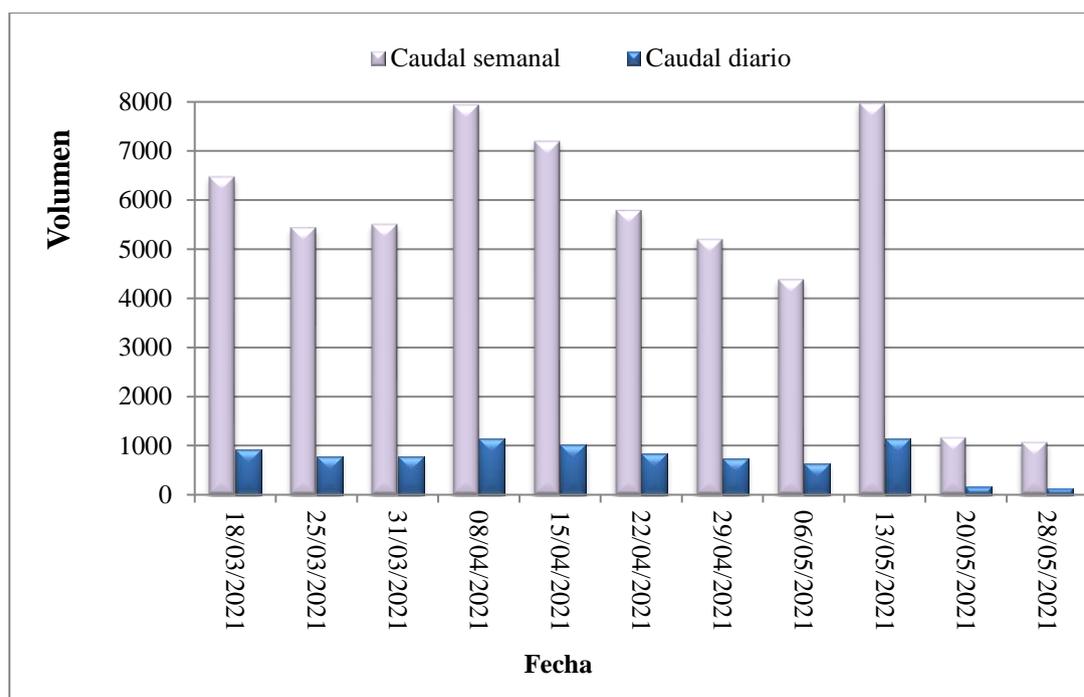


Figura 13. Comparativa entre los volúmenes diarios y semanales lixiviados por el sistema SLA asociado a SA.

6.4.2 Volumen depurado en SLA asociado a SC.

En la figura 14 se observa la comparativa entre los volúmenes diarios y semanales, que se han depurado en el SLA asociado a SC. El volumen semanal experimentó una tendencia ascendente a lo largo del tiempo. Esto puede ser debido al mayor requerimiento del cultivo en el invernadero, que nos obligó a hacer mayores descartes de soluciones de recirculación, aumentando el caudal que pasa por el SLA. El volumen semanal tiene su mínimo el día 29 de marzo con 658 L, así como el volumen diario, mientras que tiene su máximo el día 24 de mayo con 1.737 L. En cuanto al volumen diario ocurre algo parecido, presenta un mínimo el día 22 de marzo con 93 L día⁻¹, y un máximo el día 26 de abril con 226 L día⁻¹.

Una vez más, sumando los volúmenes semanales, obtenemos 13.116 L, que es el volumen de lixiviados que se generan por el cultivo de tomate tipo pera en sustrato de fibra de coco con práctica de recirculación en riego, y en un invernadero tipo multitunel de 1.000 m² en 85 días.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

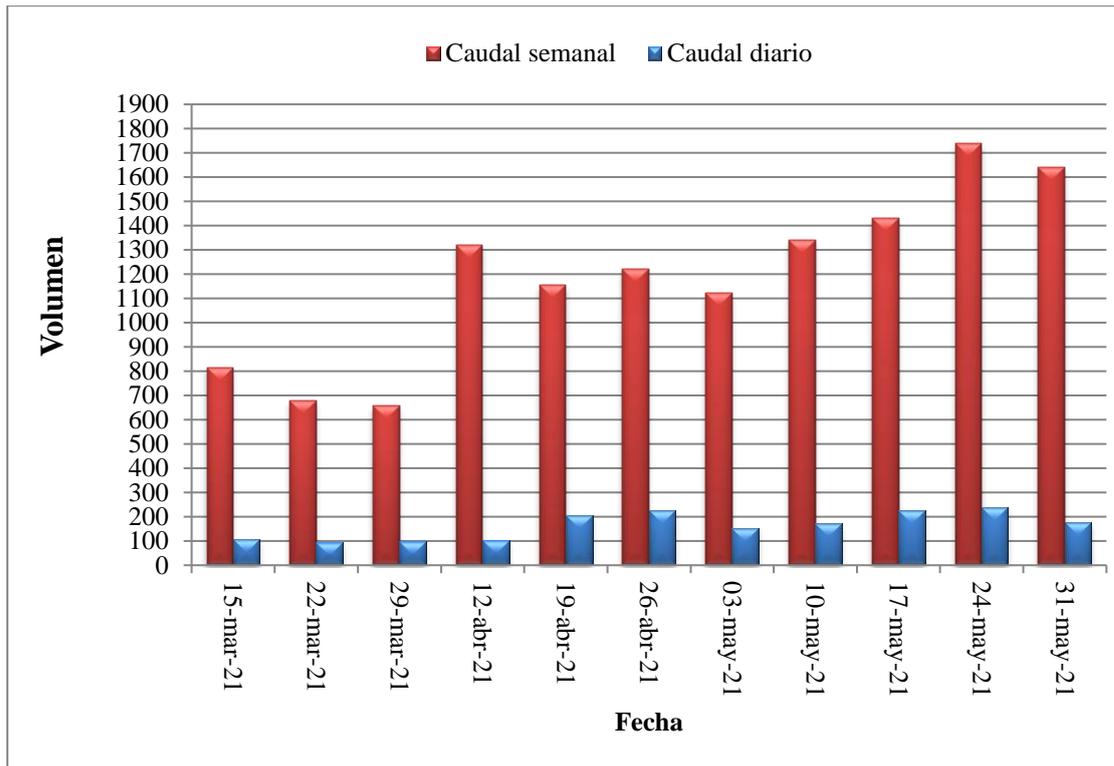


Figura 14. Comparativa de los volúmenes diarios y semanales lixiviados por el sistema SLA asociado a SC.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

7 Conclusiones.

Las conclusiones a las que se han llegado según los resultados obtenidos en este trabajo son las expuestas a continuación:

- En el sistema de lagunaje artificial asociado al sistema de cultivo cerrado, *Iris pseudacorus*, *Chrysopogon zizanioides* han mantenido en sus fosos unas concentraciones de NO_3^- cercanas al límite (50 ppm) establecido por la Directiva de nitratos de 1991, por lo que han conseguido que el impacto ambiental generado por los lixiviados del cultivo se reduzca.
- *Scirpus holoschoenus* en el sistema de lagunaje artificial asociado al sistema de cultivo cerrado ha experimentado un incremento de la reducción de la concentración de NO_3^- en el interior de su foso a lo largo del tiempo, y también se ha instalado cerca de la concentración límite, por lo que ha conseguido disminuir el impacto ambiental producido.
- Las plantas que componen el sistema de lagunaje artificial asociado al sistema de cultivo abierto han conseguido reducir la concentración de NO_3^- de los lixiviados hasta valores muy cercanos al límite establecido por la Directiva de Nitratos de 1991.
- Se ha observado en algunas de las especies evaluadas una correlación entre la capacidad de reducción de NO_3^- con las variables climáticas temperatura media, humedad relativa media e integral de radiación, así como una relación con el volumen semanal depurado.
- Un sistema de cultivo cerrado consigue un ahorro de agua muy considerable, en comparación con un sistema de cultivo abierto. El sistema cerrado, en un invernadero multitunel de 1.000 m², con cultivo de tomate en sustrato de fibra de coco, produce 13.116 L de lixiviados en 85 días, frente a 58.145 L de lixiviados producidos por el sistema abierto, en un invernadero tipo multicapilla de 896 m² con cultivo de tomate en sustrato de fibra de coco en 79 días.
- En base a los resultados obtenidos en el sistema de lagunaje artificial asociado al sistema de cultivo abierto, y sabiendo que las plantas se encontraban al inicio de la toma de muestras en un estado de desarrollo poco avanzado, se puede decir que para que este sistema de lagunaje funcione correctamente debe pasar aproximadamente un mes o un mes y medio desde la plantación de sus especies.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

8 Referencias bibliográficas

- Appelman, W., Berckmoes, E., Campos, A., Bilbao, J., Mariakakis, I., Delcour, I. 2018. Chapter 12. Reducing environmental impact – Nutrient removal and recovery. En: Thompson, R., Delcour, E., Berckmoes, E., Stavridou, E (Editores). The Fertigation Bible. I.S.B.N: 978-1-5272-2327-1: 12-1 – 12-35.
- Baixauli, C., Aguilar, J.M. 2002. Cultivo sin Suelo de Hortalizas. Aspectos Prácticos y Experiencias. Ed. Generalitat valenciana. Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Bonachela, S., Acuña, R.A., Magán, J.J. 2008. Sustratos inertes. Caracterización física. Oxigenación de los sustratos. En: Medrano, E., Sánchez-Guerrero, M.C., Lorenzo, P., Alonso, F.J. (Editores). Relaciones Hídricas y Programación de Riego en Cultivos Hortícolas en Sustratos. I.S.B.N: 978-84-691-2697-4: 27-34.
- Cánovas, F., Magán, J.J. 2003. Cultivos sin suelo. En: Cajamar (Editor). Técnicas de producción en cultivos protegidos. Tomo 2. Francisco Camacho (Coordinador) I.S.B.N.: 84-95531-16-X: 409-453.
- Céspedes, A.J., García, M.C, Pérez, J.J., Cuadrado, I.M. 2009. Preparación del suelo y sistemas de cultivo. En: Caracterización de la Explotación Hortícola Protegida Almeriense. Ed: Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería. Fundación Cajamar. I.S.B.N.: 84-88246-32-5: 99-104.
- Consejo de las Comunidades Europeas (CEE). 1991. Directiva del consejo 91/676/CEE, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. Ed: Diario Oficial de las Comunidades Europeas.
- Gandullo, J.M., Sánchez Palomares, O., Muñoz, L. 1998. Una nueva clasificación climática para España. Estudio, manejo y control de ecosistemas. Revista de Ecología Nº12. ISSN: 0214-0896: 67-77.
- Ganjo, D. G. A., Mirza, H. A. (2013). *Cyperus longus L.* as a biological purifier of wastewater for irrigation purposes: removal efficiency and Zn, Cd, Cu, Fe and Mn. Environmental Health Risk VII, 16: 249.
- Huett, D. O., Morris, S. G., Smith, G., Hunt, N. 2005. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands. *Water research*, 39(14): 3259-3272.
- Lorenzo, P., Medrano, E., Sánchez-Guerrero, M.C. 2020. Recirculación en Cultivo sin Suelo de Pepino en Almería. Página web IFAPA-SERVIFAPA, sección HORTICULTURA. Documento científico técnico. PP 18.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

- Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Baeza, E., López, J.C., Magán, J.J., Fernández, M.D., Pérez-Parra, P. 2016. Invernaderos. En: García-García, M.C., Céspedes, A.J., Pérez-Parra, J.J., Lorenzo, P (Editores). El sistema de producción hortícola protegido de la provincia de Almería: 59-105.
- Martín, E., Téllez, M.M. 2016. Control integrado de plagas en cultivo de calabacín bajo plástico en ciclo de primavera. Página web IFAPA-SERVIFAPA, sección HORTICULTURA. Documento científico técnico. PP 19.
- Medrano, E., Suárez, E., Giménez, M., Lao, T. 2019. Utilización de un sistema de lagunaje artificial para recuperar y desnitrificar los lixiviados procedentes de cultivos hortícolas en sustrato en sistemas semi-cerrados. XVII Jornadas ceiA3 del Grupo de Sustratos de la SECH.
- Narváez, L., Cunill, C., Cácers, R., Marfá, O. 2011. Design and monitoring of horizontal subsurface-flow constructed wetlands for treating nursery leachates. *Bioresource Technology* 102: 6414-6420.
- Pérez-Parra, J.J. y Céspedes, A.J. 2001. Análisis de la demanda de inputs para la producción en el sector de cultivos protegidos de Almería. Estudio de la demanda de inputs auxiliares: producción y manipulación en el sistema productivo hortícola almeriense. FIAPA: 1-102.
- Salas, M.C., Urrestarazu, M. 2002. El papel de los cultivos sin suelo en la moderna agronomía. *Vida rural* 145. ISSN: 1133-8938: 54-57
- Salas, M.C., Urrestarazu, M., Valera, D. 2003. La contaminación por nitratos en los sistemas agrícolas. *Vida rural* 15 de noviembre 2003: 38-41.
- Sarafraz, S., Mohammad, T. A., Noor, M. J., Liaghat, A. 2009. Wastewater treatment using horizontal subsurface flow constructed wetland. *American Journal of Environmental Sciences*, 5(1), 772-778.
- Tolón, A., Lastra, X. 2010. La agricultura intensiva del poniente almeriense. Diagnóstico e instrumentos de gestión ambiental. *Revista electrónic@ de Medioambiente*. 8:18-40.
- Wu, J., Zhang, J., Jia, W., Xie, H., Gu, R.R., Li, C., Gao, B. 2009. Impact of COD/N ratio on nitrous oxide emission from microcosm wetlands and their performance in removing nitrogen from wastewater. *Bioresource Technology* 100: 2910-2917.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Anejos.

Anejo I. Integración de competencias adquiridas en el grado Ingeniería Agrícola.

Las competencias adquiridas en la enseñanza de la titulación, que se han integrado y sintetizado en el desarrollo del trabajo fin de grado en el ámbito del Grado de Ingeniería Agrícola, contempladas en la Orden CIN/323/2009 son:

E-CB03– Conocimientos básicos sobre el uso y programación de los ordenadores, sistemas operativos, bases de datos y programas informáticos con aplicación en ingeniería.

Integrada en el proyecto en la utilización de Microsoft Excel y el programa ANOVA.

E-CB04– Conocimientos básicos de la química general, química orgánica e inorgánica y sus aplicaciones en la ingeniería.

Integrada en el proyecto en la formulación de compuestos implicados en él, como acetato sódico (CH_3COONa), nitrato (NO_3^-) ...

E-CA01– Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de: Identificación y caracterización de especies vegetales

Integrada en el proyecto en el conocimiento y estudio de las plantas de los sistemas de lagunaje artificial, así como de las especies vegetales cultivadas en los invernaderos.

CTH01 – Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de Tecnología de la Producción Hortofrutícola: Bases y tecnología de la propagación y producción hortícola, frutícola y ornamental. Control de calidad de productos hortofrutícolas. Comercialización. Genética y mejora vegetal.

Integrada en el proyecto en el conocimiento y evaluación de sistemas de cultivo abierto y cerrado.

CTH05 – Capacidad para conocer, comprender y utilizar los principios de Material vegetal: producción, uso y mantenimiento.

Integrada en el proyecto mediante el seguimiento del desarrollo de las plantas que componen el sistema de lagunaje artificial asociado al sistema de cultivo abierto.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Anejo II. Análisis estadístico.

1. Ensayo SLA asociado a SC. “C8”

1.1. Queremos saber si existe una tendencia de reducción de nitratos a lo largo del ensayo (tiempo) en las 3 especies estudiadas.

Con este análisis encontramos que solo la reducción de *S. holoschoenus* presenta una tendencia en el tiempo, definida por su recta de regresión.

Regresión Simple – *I. pseudacorus* vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO3}-*I. pseudacorus* (CR= capacidad de reducción)

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Ajuste Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	74,5337	14,359	5,19075	0,0004
Pendiente	0,0751236	0,127797	0,587834	0,5697

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	50,3292	1	50,3292	0,35	0,5697
Residuo	1456,5	10	145,65		
Total (Corr.)	1506,83	11			

Coefficiente de Correlación = 0,182759 (muy bajo)

R-cuadrada = 3,34007 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = -6,32592 por ciento

Error estándar del est. = 12,0686

Error absoluto medio = 6,89315

Estadístico Durbin-Watson = 2,4189 (P=0,6572)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,215493

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO3}-*I. pseudacorus* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO3}\text{-}I.\text{pseudacorus} = 74,53 + 0,08 \cdot DJ$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0,05, **no** hay una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO3}-*I. pseudacorus* y DJ con un nivel de confianza del 95,0% ó más.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 3,34007% de la variabilidad en %Reducción Iris pseudacorus. El coeficiente de correlación es igual a 0,182759, indicando una relación relativamente débil entre las variables.

Regresión Simple – *S. holoschoenus* vs. DJ

Variable dependiente: $CR_{NO_3^-}$ *S. holoschoenus*

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-19,3275	15,876	-1,21741	0,2514
Pendiente	0,62761	0,141299	4,44171	0,0013

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	3512,75	1	3512,75	19,73	0,0013
Residuo	1780,52	10	178,052		
Total (Corr.)	5293,27	11			

Coefficiente de Correlación = 0,814633

R-cuadrada = 66,3626 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 62,9989 por ciento

Error estándar del est. = 13,3436

Error absoluto medio = 9,53074

Estadístico Durbin-Watson = 3,10557 (P=0,9666)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,609311

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre $CR_{NO_3^-}$ *S. holoschoenus* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3^-} \text{ } S. \text{ holoschoenus} = -19,33 + 0,63 \cdot DJ$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre $CR_{NO_3^-}$ *S. holoschoenus* y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 66,3626% de la variabilidad en %Reducción Scirpus holoschoenus. El coeficiente de correlación es igual a 0,814633, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Regresión Simple – Vetiver (*C. zizanioides*) vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO3}-Vetiver

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	80,5567	6,59049	12,2232	0,0000
Pendiente	0,067714	0,0586565	1,15442	0,2752

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	40,8906	1	40,8906	1,33	0,2752
Residuo	306,831	10	30,6831		
Total (Corr.)	347,722	11			

Coefficiente de Correlación = 0,342922

R-cuadrada = 11,7596 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 2,93554 por ciento

Error estándar del est. = 5,53924

Error absoluto medio = 4,51548

Estadístico Durbin-Watson = 0,857454 (P=0,0036)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,385625

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO3}-Vetiver y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO3}\text{-Vetiver} = 80,56 + 0,068 \cdot DJ$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual a 0,05, **no** hay una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO3}-Vetiver y DJ con un nivel de confianza del 95,0% ó más.

1.2. Queremos saber si el % de reducción de NO₃⁻ depende del caudal de entrada de lixiviados y de los parámetros climáticos

Regresión Múltiple – *I. pseudacorus*

Variable dependiente: CR_{NO3}-*I. pseudacorus*

Variables independientes:

Caudal semanal (Q)

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	43,2768	102,078	0,423957	0,6864
Q	-0,0893305	0,121167	-0,737251	0,4888
IR	1,08566	3,57508	0,303673	0,7716
T	1,51704	4,0519	0,374402	0,7210
HR	0,0900219	1,01907	0,088337	0,9325

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	280,966	4	70,2414	0,34	0,8395
Residuo	1224,95	6	204,159		
Total (Corr.)	1505,92	10			

R-cuadrada = **18,6574** por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = **0** por ciento

Error estándar del est. = **14,2884**

Error absoluto medio = **6,74109**

Estadístico Durbin-Watson = 3,05173 (P=**0,9291**)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,547457

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO_3} -*I. pseudacorus* y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3}\text{-}I. pseudacorus = 43,28 - 0,09*Q + 1,09*IR + 1,52*T + 0,09*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, **no** existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Regresión Múltiple – *S. holoschoenus*

Variable dependiente: CR_{NO_3} -*S. holoschoenus*

Variabes independientes:

Caudal semanal (Q)

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-33,0576	92,9603	-0,355609	0,7343
Q	-0,00252011	0,110344	-0,0228387	0,9825
IR	-2,49297	3,25574	-0,765714	0,4729
T	10,1175	3,68997	2,74191	0,0337
HR	-0,5175	0,928046	-0,557623	0,5973

Análisis de Varianza

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	4017,12	4	1004,28	5,93	0,0279
Residuo	1015,89	6	169,315		
Total (Corr.)	5033,01	10			

R-cuadrada = 79,8154 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 66,3591 por ciento

Error estándar del est. = 13,0121

Error absoluto medio = 7,75638

Estadístico Durbin-Watson = 3,18803 (P=0,9605)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,622653

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO_3} - *S. holoschoenus* y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3}\text{- } S. \text{ holoschoenus} = -33,06 - 0,003*Q - 2,49*IR + 10,12*T - 0,52*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 79,8154% de la variabilidad en CR_{NO_3} - *S. holoschoenus*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 66,3591%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 13,0121. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 7,75638 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,9825, que corresponde a Caudal semanal. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Caudal semanal del modelo.

Regresión Múltiple – *S. holoschoenus*

Variable dependiente: CR_{NO_3} - *S. holoschoenus*

Variables independientes:

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	-64,2199	55,5903	-1,15523	0,2813

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

IR	-1,07017	1,52819	-0,700285	0,5036
T	9,13971	2,12054	4,31009	0,0026
HR	-0,259738	0,633687	-0,409884	0,6926

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4231,75	3	1410,58	10,63	0,0036
Residuo	1061,52	8	132,69		
Total (Corr.)	5293,27	11			

R-cuadrada = 79,9458 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 72,4255 por ciento

Error estándar del est. = 11,5191

Error absoluto medio = 7,89458

Estadístico Durbin-Watson = 3,1649 (P=0,9797)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,624518

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO_3} -*S. holoschoenus* y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3}\text{-}S.\text{ holoschoenus} = -64,22 - 1,07*IR + 9,14*T - 0,26*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,6926, que corresponde a HR. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar HR del modelo.

Regresión Múltiple – *S. holoschoenus*

Variable dependiente: CR_{NO_3} -*S. holoschoenus*

Variables independientes:

Integral de radiación media diaria (IR)

Temperatura media (T)

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-84,6947	23,2382	-3,64463	0,0054
IR	-0,788181	1,29997	-0,606305	0,5593
T	8,93838	1,96521	4,54832	0,0014

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4209,45	2	2104,73	17,48	0,0008
Residuo	1083,81	9	120,424		
Total (Corr.)	5293,27	11			

R-cuadrada = 79,5247 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 74,9746 por ciento

Error estándar del est. = 10,9738

Error absoluto medio = 7,73278

Estadístico Durbin-Watson = 3,09895 (P=0,9533)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,590776

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre $CR_{NO_3^-}$ *S. holoschoenus* y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3^-} \text{ } S. \text{ holoschoenus} = -84,70 - 0,79 * IR + 8,94 * T$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 79,5247% de la variabilidad en $CR_{NO_3^-}$ *S. holoschoenus*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 74,9746.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,5593, que corresponde a IR. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar IR.

Regresión Múltiple – *S. holoschoenus*

Variable dependiente: $CR_{NO_3^-}$ *S. holoschoenus*

Variables independientes:

Temperatura media (T)

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-85,847	22,4161	-3,82971	0,0033
T	8,08714	1,33091	6,07641	0,0001

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4165,18	1	4165,18	36,92	0,0001
Residuo	1128,08	10	112,808		
Total (Corr.)	5293,27	11			

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

R-cuadrada = 78,6884 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 76,5572 por ciento
 Error estándar del est. = 10,6211
 Error absoluto medio = 7,90388
 Estadístico Durbin-Watson = 3,12017 (P=0,9759)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,613046

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO_3} -*S. holoschoenus* y 1 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3}\text{-}S. \textit{holoschoenus} = -85,85 + 8,09 * T$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 78,6884% de la variabilidad en CR_{NO_3} -*S. holoschoenus*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 76,5572%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0001, que corresponde a T. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente **no** quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

Regresión Múltiple – Vetiver (*C. zizanioides*)

Variable dependiente: CR_{NO_3} -Vetiver

VARIABLES INDEPENDIENTES:

- Caudal semanal (Q)
- Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/M2 día)
- Temperatura media (T)
- Humedad relativa media (HR)

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	121,52	32,6714	3,71946	0,0099
Q	0,0277192	0,038781	0,714763	0,5016
IR	0,0334086	1,14425	0,029197	0,9777
T	-0,538243	1,29686	-0,415036	0,6925
HR	-0,404863	0,326167	-1,24128	0,2608

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
--------	-------------------	----	----------------	---------	---------

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Modelo	52,2484	4	13,0621	0,62	0,6623
Residuo	125,484	6	20,914		
Total (Corr.)	177,732	10			

R-cuadrada = 29,3973 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 0 por ciento

Error estándar del est. = 4,57318

Error absoluto medio = 2,90546

Estadístico Durbin-Watson = 0,896777 (P=0,0111)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,328996

El StatAdvisor

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, **no** existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

2. Ensayo SLA asociado a SA. “Biogreen”

2.1. Queremos saber si existe una tendencia de reducción de nitratos a lo largo del ensayo (tiempo) en las especies estudiadas.

Regresión Simple – *I. pseudacorus* vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO3}- *I. pseudacorus*

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-25,375	22,4797	-1,1288	0,2853
Pendiente	0,838216	0,202154	4,14643	0,0020

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5003,25	1	5003,25	17,19	0,0020
Residuo	2910,08	10	291,008		
Total (Corr.)	7913,33	11			

Coefficiente de Correlación = 0,795145

R-cuadrada = 63,2256 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 59,5482 por ciento

Error estándar del est. = 17,0589

Error absoluto medio = 12,1506

Estadístico Durbin-Watson = 1,53351 (P=0,1078)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,221205

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO3}- *I. pseudacorus* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO3}\text{-}I.\text{ pseudacorus} = -25,38 + 0,84 \cdot DJ$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO3}- *I. pseudacorus* y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 63,2256% de la variabilidad en CR_{NO3}- *I. pseudacorus*. El coeficiente de correlación es igual a 0,795145, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Regresión Simple - *Cyperus longus* vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO3}- *C. Longus*

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-12,3924	24,4586	-0,50667	0,6234
Pendiente	0,679202	0,219949	3,08799	0,0115

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	3285,03	1	3285,03	9,54	0,0115
Residuo	3444,98	10	344,498		
Total (Corr.)	6730,01	11			

Coefficiente de Correlación = 0,698653

R-cuadrada = 48,8117 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 43,6928 por ciento

Error estándar del est. = 18,5607

Error absoluto medio = 13,4051

Estadístico Durbin-Watson = 1,79467 (P=0,2274)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,102148

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO3}- *C. Longus* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO3}\text{-}C.\text{ Longus} = -12,39 + 0,68 \cdot DJ$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO3}- *C. Longus* y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 48,8117% de la variabilidad en CR_{NO_3} - *C. Longus*. El coeficiente de correlación es igual a 0,698653, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Regresión Simple – *H. portulacoides* vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO_3} - *H. portulacoides*

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-22,5507	24,6415	-0,915151	0,3817
Pendiente	0,80268	0,221594	3,6223	0,0047

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	4588,03	1	4588,03	13,12	0,0047
Residuo	3496,68	10	349,668		
Total (Corr.)	8084,71	11			

Coefficiente de Correlación = 0,753322

R-cuadrada = 56,7494 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 52,4244 por ciento

Error estándar del est. = 18,6994

Error absoluto medio = 13,0459

Estadístico Durbin-Watson = 1,52624 (P=0,1052)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,233595

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO_3} - *H. portulacoides* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3}\text{-}H. portulacoides = -22,55 + 0,80 \cdot DJ$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO_3} - *H. portulacoides* y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 56,7494% de la variabilidad en CR_{NO_3} - *H. portulacoides*. El coeficiente de correlación es igual a 0,753322, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Regresión Simple - *P. australis* vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO_3} - *P. australis*

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-26,7739	23,4436	-1,14205	0,2800
Pendiente	0,829413	0,210822	3,93418	0,0028

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	4898,72	1	4898,72	15,48	0,0028
Residuo	3165,0	10	316,5		
Total (Corr.)	8063,72	11			

Coefficiente de Correlación = 0,779424

R-cuadrada = 60,7501 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 56,8251 por ciento

Error estándar del est. = 17,7904

Error absoluto medio = 12,6268

Estadístico Durbin-Watson = 1,91643 (P=0,3004)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0396923

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO3}- *P. australis* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{CR}_{\text{NO}_3}\text{-}P.\text{australis} = -26,77 + 0,83 \cdot \text{DJ}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO3}- *P. australis* y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 60,7501% de la variabilidad en CR_{NO3}- *P. australis*. El coeficiente de correlación es igual a 0,779424, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Regresión Simple – *J. maritimus* vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO3}- *J. maritimus*

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-41,5079	18,0163	-2,3039	0,0440
Pendiente	0,925245	0,162016	5,71082	0,0002

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
---------------	--------------------------	-----------	-----------------------	----------------	----------------

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Modelo	6096,13	1	6096,13	32,61	0,0002
Residuo	1869,21	10	186,921		
Total (Corr.)	7965,34	11			

Coeficiente de Correlación = 0,874833
 R-cuadrada = 76,5333 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 74,1866 por ciento
 Error estándar del est. = 13,6719
 Error absoluto medio = 9,94082
 Estadístico Durbin-Watson = 2,60597 (P=0,7776)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,32825

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO_3} - *J. maritimus* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3}\text{-}J.\text{ maritimus} = -41,51 + 0,93 \cdot DJ$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO_3} - *J. maritimus* y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 76,5333% de la variabilidad en CR_{NO_3} - *J. maritimus*. El coeficiente de correlación es igual a 0,874833, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Regresión Simple – *S. holoschoenus* vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO_3} - *S. holoschoenus*

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-48,0362	14,505	-3,31169	0,0079
Pendiente	0,966647	0,13044	7,41067	0,0000

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	6653,91	1	6653,91	54,92	0,0000
Residuo	1211,61	10	121,161		
Total (Corr.)	7865,51	11			

Coeficiente de Correlación = 0,919761
 R-cuadrada = 84,596 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 83,0556 por ciento
 Error estándar del est. = 11,0073
 Error absoluto medio = 8,21137

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Estadístico Durbin-Watson = 2,23186 (P=0,5222)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,161312

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO3}- *S. holoschoenus* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{CR}_{\text{NO}_3}\text{- } S. \text{ holoschoenus} = -48,04 + 0,97 \cdot \text{DJ}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO3}- *S. holoschoenus* y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 84,596% de la variabilidad en CR_{NO3}- *S. holoschoenus*. El coeficiente de correlación es igual a 0,919761, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables.

Regresión Simple – *J. effusus* vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO3}- *J. effusus*
Variable independiente: Día juliano (DJ)
Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-38,4743	21,2495	-1,8106	0,1003
Pendiente	0,914113	0,191091	4,78366	0,0007

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	5950,33	1	5950,33	22,88	0,0007
Residuo	2600,28	10	260,028		
Total (Corr.)	8550,61	11			

Coefficiente de Correlación = 0,834203
R-cuadrada = 69,5895 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 66,5485 por ciento
Error estándar del est. = 16,1254
Error absoluto medio = 12,2861
Estadístico Durbin-Watson = 1,74844 (P=0,2023)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,119279

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO3}- *J. effusus* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{CR}_{\text{NO}_3}\text{- } J. \text{ effusus} = -38,47 + 0,91 \cdot \text{DJ}$$

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO3}- *J. effusus* y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 69,5895% de la variabilidad en CR_{NO3}- *J. effusus*. El coeficiente de correlación es igual a 0,834203, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Regresión Simple – *T. domingensis* vs. DJ

Variable dependiente: CR_{NO3}- *T. domingensis*

Variable independiente: Día juliano (DJ)

Lineal: $Y = a + b \cdot X$

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-57,9269	16,3598	-3,5408	0,0053
Pendiente	1,08129	0,14712	7,34973	0,0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	8325,77	1	8325,77	54,02	0,0000
Residuo	1541,28	10	154,128		
Total (Corr.)	9867,05	11			

Coefficiente de Correlación = 0,918583

R-cuadrada = 84,3795 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 82,8175 por ciento

Error estándar del est. = 12,4148

Error absoluto medio = 8,85761

Estadístico Durbin-Watson = 1,81541 (P=0,2391)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,0474428

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre CR_{NO3}- *T. domingensis* y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{CR}_{\text{NO}_3} \text{ } T. \text{ domingensis} = -57,93 + 1,08 \cdot \text{DJ}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre CR_{NO3}- *T. domingensis* y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 84,3795% de la variabilidad en CR_{NO3}- *T. domingensis*. El coeficiente de correlación es igual a 0,918583, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

2.2. Queremos saber si el % de reducción de NO₃⁻ depende del volumen de entrada de lixiviados y de los parámetros climáticos

Regresión Múltiple – *I. pseudacorus*

Variable dependiente: CR_{NO₃}- *I. pseudacorus*

Variables independientes:

Caudal semanal (Q)

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	-376,311	102,85	-3,65884	0,0146
Q	-0,00188638	0,00288683	-0,653443	0,5423
IR	6,51771	3,58844	1,81631	0,1290
T	2,16494	4,0202	0,538516	0,6133
HR	4,03382	1,04494	3,86036	0,0119

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	4674,53	4	1168,63	5,32	0,0478
Residuo	1099,02	5	219,805		
Total (Corr.)	5773,56	9			

R-cuadrada = **80,9645** por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = **65,7361** por ciento

Error estándar del est. = **14,8258**

Error absoluto medio = **8,02772**

Estadístico Durbin-Watson = 2,79242 (P=**0,7341**)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,417762

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO₃}- *I. pseudacorus* y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3} \text{ - } I. \text{ pseudacorus} = -376,31 - 0,002*Q + 6,52*IR + 2,17*T + 4,03*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 80,9645% de la variabilidad en CR_{NO₃}- *I. pseudacorus*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 65,7361%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,6133, que corresponde a T. Puesto que el valor-P es mayor o igual que

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar T del modelo.

Regresión Múltiple – *I. pseudacorus*

Variable dependiente: CR_{NO3}- *I. pseudacorus*

Variables independientes:

Caudal semanal (Q)

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Humedad relativa media (HR)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	-382,307	96,0054	-3,98215	0,0073
Q	-0,00251238	0,00248117	-1,01258	0,3503
IR	8,01842	2,12274	3,77739	0,0092
HR	4,26346	0,89575	4,75965	0,0031

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	4610,79	3	1536,93	7,93	0,0165
Residuo	1162,77	6	193,795		
Total (Corr.)	5773,56	9			

R-cuadrada = **79,8605** por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = **69,7907** por ciento

Error estándar del est. = **13,921**

Error absoluto medio = **8,25463**

Estadístico Durbin-Watson = 2,71872 (P=**0,7193**)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,416441

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO3}- *I. pseudacorus* y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO3}\text{- } I. \text{ pseudacorus} = -382,31 - 0,003*Q + 8,02*IR + 4,26*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 79,8605% de la variabilidad en CR_{NO3}- *I. pseudacorus*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 69,7907

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,3503, que corresponde a Caudal semanal. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% o mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Caudal semanal del modelo.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Regresión Múltiple – *I. pseudacorus*

Variable dependiente: CR_{NO3}- *I. pseudacorus*

Variabes independientes:

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Humedad relativa media (HR)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	-420,655	103,776	-4,05348	0,0037
IR	8,7823	2,30892	3,80364	0,0052
HR	4,3539	0,952921	4,569	0,0018

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	5237,67	2	2618,83	11,03	0,0050
Residuo	1899,21	8	237,401		
Total (Corr.)	7136,88	10			

R-cuadrada = **73,3888** por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = **66,736** por ciento

Error estándar del est. = **15,4078**

Error absoluto medio = **10,5003**

Estadístico Durbin-Watson = 2,4143 (P=**0,5906**)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,34581

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO3}- *I. pseudacorus* y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{CR}_{\text{NO}_3}\text{- } I. \text{ pseudacorus} = -420,66 + 8,78 \cdot \text{IR} + 4,35 \cdot \text{HR}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 73,3888% de la variabilidad en CR_{NO3}- *I. pseudacorus*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 66,736%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0052, que corresponde a IR. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

Regresión Múltiple – *C. Longus*

Variable dependiente: CR_{NO3}- *C. Longus*

Variabes independientes:

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Caudal semanal (Q)
Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)
Temperatura media (T)
Humedad relativa media (HR)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	-316,111	135,524	-2,3325	0,0670
Q	-0,000566732	0,00380395	-0,148985	0,8874
IR	4,415	4,72845	0,933709	0,3933
T	3,36794	5,29738	0,635775	0,5529
HR	3,31142	1,3769	2,40498	0,0612

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	3522,84	4	880,709	2,31	0,1918
Residuo	1908,25	5	381,65		
Total (Corr.)	5431,08	9			

R-cuadrada = **64,8643** por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = **36,7558** por ciento
Error estándar del est. = **19,5359**
Error absoluto medio = **10,792**
Estadístico Durbin-Watson = 2,83336 (P=**0,7551**)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,444254

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO₃- C. Longus} y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3- C. Longus} = -316,11 - 0,0006*Q + 4,41*IR + 3,37*T + 3,31*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, **no** existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 64,8643% de la variabilidad en CR_{NO₃- C. Longus}. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 36,7558

Regresión Múltiple – *H. portulacoides*

Variable dependiente: CR_{NO₃- *H. portulacoides*}

Variabes independientes:

Caudal semanal (Q)
Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)
Temperatura media (T)
Humedad relativa media (HR)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
--	--	--------------	--------------------	--

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-377,818	120,198	-3,1433	0,0256
Q	-0,00160456	0,00337377	-0,4756	0,6544
IR	5,23664	4,19372	1,24869	0,2671
T	3,96786	4,69831	0,844528	0,4369
HR	3,93573	1,22119	3,22286	0,0234

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4987,53	4	1246,88	4,15	0,0752
Residuo	1501,05	5	300,211		
Total (Corr.)	6488,59	9			

R-cuadrada = 76,8662 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 58,3592 por ciento

Error estándar del est. = 17,3266

Error absoluto medio = 9,68038

Estadístico Durbin-Watson = 2,72214 (P=0,6967)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,380793

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO_3} -*H. portulacoides* y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3}\text{-}H. portulacoides = -377,82 - 0,002*Q + 5,24*IR + 3,97*T + 3,94*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, **no** existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 76,8662% de la variabilidad en CR_{NO_3} -*H. portulacoides*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 58,3592%.

Regresión Múltiple – *P. australis*

Variable dependiente: CR_{NO_3} -*P. australis*

Variables independientes:

Caudal semanal (Q)

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-377,281	118,815	-3,17538	0,0247
Q	-0,00284819	0,00333493	-0,854046	0,4321
IR	6,84383	4,14545	1,65093	0,1597

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

T	2,11793	4,64423	0,456034	0,6675
HR	3,99666	1,20713	3,31087	0,0212

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4786,69	4	1196,67	4,08	0,0776
Residuo	1466,69	5	293,339		
Total (Corr.)	6253,39	9			

R-cuadrada = 76,5456 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 57,7821 por ciento

Error estándar del est. = 17,1271

Error absoluto medio = 9,53912

Estadístico Durbin-Watson = 2,84329 (P=0,7601)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,44182

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO3}-*P. australis* y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO3}\text{-}P. \textit{australis} = -377,28 - 0,003*Q + 6,84*IR + 2,12*T + 4,00*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, **no** existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 76,5456% de la variabilidad en CR_{NO3}-*P. australis*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 57,7821%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 17,1271.

Regresión Múltiple – *J. maritimus*

Variable dependiente: CR_{NO3}-*J. maritimus*

Variables independientes:

Caudal semanal (Q)

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-339,595	116,467	-2,91581	0,0332
Q	-0,00287392	0,00326904	-0,879131	0,4196
IR	5,90633	4,06354	1,45349	0,2058
T	4,38829	4,55247	0,963936	0,3793
HR	3,1112	1,18328	2,62929	0,0466

Análisis de Varianza

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	4751,08	4	1187,77	4,21	0,0733
Residuo	1409,31	5	281,862		
Total (Corr.)	6160,39	9			

R-cuadrada = 77,123 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 58,8214 por ciento

Error estándar del est. = 16,7888

Error absoluto medio = 9,32723

Estadístico Durbin-Watson = 2,76965 (P=0,7221)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,395791

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre $CR_{NO_3-J. maritimus}$ y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3-J. maritimus} = -339,60 - 0,003*Q + 5,91*IR + 4,39*T + 3,11*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0,05, **no** existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 77,123% de la variabilidad en $CR_{NO_3-J. maritimus}$. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 58,8214%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 16,7888.

Regresión Múltiple – *S. holoschoenus*

Variable dependiente: $CR_{NO_3-S. holoschoenus}$

Variables independientes:

Caudal semanal (Q)

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
CONSTANTE	-376,085	59,1007	-6,36346	0,0014
Q	-0,00365377	0,00165886	-2,20258	0,0788
IR	9,2531	2,06203	4,48738	0,0065
T	1,63006	2,31013	0,705616	0,5119
HR	3,3705	0,600453	5,61326	0,0025

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5561,47	4	1390,37	19,16	0,0031
Residuo	362,899	5	72,5798		
Total (Corr.)	5924,37	9			

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

R-cuadrada = 93,8745 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 88,974 por ciento
 Error estándar del est. = 8,51938
 Error absoluto medio = 4,90334
 Estadístico Durbin-Watson = 2,81699 (P=0,7468)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,421309

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre $CR_{NO_3-S. \text{ holoschoenus}}$ y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3-S. \text{ holoschoenus}} = -376,09 - 0,004*Q + 9,25*IR + 1,63*T + 3,37*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 93,8745% de la variabilidad en $CR_{NO_3-S. \text{ holoschoenus}}$. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 88,974%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 8,51938.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,5119, que corresponde a T. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar T del modelo.

Regresión Múltiple - *S. holoschoenus*

Variable dependiente: $CR_{NO_3-S. \text{ holoschoenus}}$

Variabes independientes:

- Caudal semanal (Q)
- Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)
- Humedad relativa media (HR)

<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico T</i>	<i>Valor-P</i>
CONSTANTE	-380,6	56,2413	-6,76727	0,0005
Q	-0,00412511	0,0014535	-2,83804	0,0296
IR	10,383	1,24353	8,34964	0,0002
HR	3,5434	0,524743	6,75264	0,0005

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	5525,33	3	1841,78	27,69	0,0007
Residuo	399,036	6	66,506		
Total (Corr.)	5924,37	9			

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

R-cuadrada = 93,2645 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 89,8967 por ciento
 Error estándar del est. = 8,15512
 Error absoluto medio = 5,37205
 Estadístico Durbin-Watson = 2,77405 (P=0,7513)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,431392

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CR_{NO_3} - *S. holoschoenus* y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3}\text{- } S. \text{ holoschoenus} = -380,60 - 0,004*Q + 10,38*IR + 3,54*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 93,2645% de la variabilidad en CR_{NO_3} - *S. holoschoenus*. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 89,8967%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 8,15512.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0296, que corresponde a Caudal semanal. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

Regresión Múltiple – *J. effusus*

Variable dependiente: CR_{NO_3} -*J. effusus*

VARIABLES INDEPENDIENTES:

- Caudal semanal (Q)
- Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)
- Temperatura media (T)
- Humedad relativa media (HR)

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-413,217	109,385	-3,77763	0,0129
Q	-0,0021493	0,00307027	-0,700037	0,5151
IR	7,62652	3,81646	1,99832	0,1022
T	2,35046	4,27566	0,549731	0,6062
HR	4,13005	1,11133	3,7163	0,0138

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5317,27	4	1329,32	5,35	0,0473
Residuo	1243,13	5	248,627		
Total (Corr.)	6560,4	9			

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

R-cuadrada = 81,051 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 65,8917 por ciento
 Error estándar del est. = 15,7679
 Error absoluto medio = 8,6045
 Estadístico Durbin-Watson = 2,61848 (P=0,6393)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,341575

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre $CR_{NO_3-J. effusus}$ y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3-J. effusus} = -413,22 - 0,002*Q + 7,63*IR + 2,35*T + 4,13*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 81,051% de la variabilidad en $CR_{NO_3-J. effusus}$. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 65,8917%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 15,7679.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,6062, que corresponde a T. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar T del modelo.

Regresión Múltiple – J. effusus

Variable dependiente: $CR_{NO_3-J. effusus}$

Variables independientes:

- Caudal semanal (Q)
- Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)
- Humedad relativa media (HR)

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-419,727	102,224	-4,10597	0,0063
Q	-0,00282894	0,00264187	-1,07081	0,3254
IR	9,25583	2,26023	4,09508	0,0064
HR	4,37936	0,953767	4,59165	0,0037

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5242,13	3	1747,38	7,95	0,0164
Residuo	1318,27	6	219,712		
Total (Corr.)	6560,4	9			

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

R-cuadrada = 79,9057 por ciento
 R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 69,8585 por ciento
 Error estándar del est. = 14,8227
 Error absoluto medio = 9,00921
 Estadístico Durbin-Watson = 2,52856 (P=0,6010)
 Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,339346

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre $CR_{NO_3-J. effusus}$ y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3-J. effusus} = -419,73 - 0,003*Q + 9,26*IR + 4,38*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 79,9057% de la variabilidad en $CR_{NO_3-J. effusus}$. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 69,8585%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 14,8227. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 9,00921 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,3254, que corresponde a Caudal semanal. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Caudal semanal del modelo.

Regresión Múltiple – J. effusus

Variable dependiente: $CR_{NO_3-J. effusus}$

Variáveis independientes:

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m2 día)

Humedad relativa media (HR)

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-447,497	101,242	-4,42007	0,0022
IR	9,84865	2,25253	4,37226	0,0024
HR	4,35374	0,929648	4,68322	0,0016

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5640,35	2	2820,18	12,48	0,0035

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Residuo	1807,58	8	225,947		
Total (Corr.)	7447,93	10			

R-cuadrada = **75,7305** por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = **69,6631** por ciento

Error estándar del est. = **15,0315**

Error absoluto medio = **10,4154**

Estadístico Durbin-Watson = 2,60734 (P=**0,7184**)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,376338

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre $CR_{NO_3-J. effusus}$ y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3-J. effusus} = -447,50 + 9,85*IR + 4,35*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 75,7305% de la variabilidad en $CR_{NO_3-J. effusus}$. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 69,6631%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 15,0315.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0024, que corresponde a IR. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

Regresión Múltiple – *T. domingensis*

Variable dependiente: $CR_{NO_3-T. domingensis}$

Variables independientes:

Caudal semanal (Q)

Integral de radiación media diaria (MJ/m² día)

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-362,296	111,848	-3,23919	0,0230
Q	-0,00270581	0,00313938	-0,861892	0,4281
IR	4,63366	3,90237	1,1874	0,2884
T	6,38097	4,37191	1,45954	0,2042
HR	3,33672	1,13635	2,93634	0,0324

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
--------	-------------------	----	----------------	---------	---------

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Modelo	5569,35	4	1392,34	5,36	0,0471
Residuo	1299,73	5	259,947		
Total (Corr.)	6869,08	9			

R-cuadrada = 81,0785 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 65,9413 por ciento

Error estándar del est. = 16,1229

Error absoluto medio = 9,54337

Estadístico Durbin-Watson = 1,96196 (P=0,2783)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,0166876

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre $CR_{NO_3-T. domingensis}$ y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3-T. domingensis} = -362,30 - 0,003*Q + 4,63*IR + 6,38*T + 3,34*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 81,0785% de la variabilidad en $CR_{NO_3-T. domingensis}$. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 65,9413%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 16,1229.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,4281, que corresponde a Caudal semanal. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Caudal semanal del modelo.

Regresión Múltiple - *T. domingensis*

Variable dependiente: $CR_{NO_3-T. domingensis}$

VARIABLES INDEPENDIENTES:

Integral de radiación media diaria (IR) (MJ/m² día)

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-376,978	107,364	-3,51123	0,0098
IR	3,01802	3,56725	0,846036	0,4255
T	9,39178	3,54272	2,65101	0,0329
HR	3,04215	1,03733	2,93269	0,0219

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
--------	-------------------	----	----------------	---------	---------

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Modelo	7083,84	3	2361,28	9,66	0,0070
Residuo	1710,55	7	244,364		
Total (Corr.)	8794,39	10			

R-cuadrada = 80,5495 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 72,2136 por ciento

Error estándar del est. = 15,6322

Error absoluto medio = 10,2888

Estadístico Durbin-Watson = 2,40095 (P=0,5441)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,246861

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre $CR_{NO_3-T. domingensis}$ y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3-T. domingensis} = -376,98 + 3,02*IR + 9,39*T + 3,04*HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 80,5495% de la variabilidad en $CR_{NO_3-T. domingensis}$. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 72,2136%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 15,6322. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 10,2888 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95,0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,4255, que corresponde a IR. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar IR del modelo.

Regresión Múltiple – *T. domingensis*

Variable dependiente: $CR_{NO_3-T. domingensis}$

Variables independientes:

Temperatura media (T)

Humedad relativa media (HR)

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-312,66	74,4524	-4,19946	0,0030
T	11,6522	2,28473	5,10005	0,0009
HR	2,45225	0,754273	3,25115	0,0117

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	6908,93	2	3454,47	14,66	0,0021
Residuo	1885,46	8	235,683		
Total (Corr.)	8794,39	10			

R-cuadrada = 78,5607 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 73,2008 por ciento

Error estándar del est. = 15,352

Error absoluto medio = 10,8465

Estadístico Durbin-Watson = 2,39791 (P=0,5675)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,226518

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre $CR_{NO_3-T. domingensis}$ y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO_3-T. domingensis} = -312,66 + 11,65 * T + 2,45 * HR$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 78,5607% de la variabilidad en $CR_{NO_3-T. domingensis}$. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 73,2008%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 15,352.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0117, que corresponde a HR. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

3. Comparación de rectas de regresión

En el primer ensayo solo teníamos una recta de regresión, por tanto no la podemos comparar con ninguna.

Sin embargo, en este segundo ensayo todas las especies estudiadas se modifican en función del tiempo. Mediante la comparación de rectas vamos a intentar presentar una recta de regresión para todas.

Regresión Simple - CR_{NO_3} vs. DJ

Variable dependiente: % Reducción

Variable independiente: DJ (Día juliano)

Lineal: $Y = a + b * X$

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Coefficientes

	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	-34,1297	7,08035	-4,82033	0,0000
Pendiente	0,879601	0,0636717	13,8146	0,0000

Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	44076,0	1	44076,0	190,84	0,0000
Residuo	21709,6	94	230,953		
Total (Corr.)	65785,6	95			

Coefficiente de Correlación = 0,818532

R-cuadrada = 66,9995 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 66,6484 por ciento

Error estándar del est. = 15,1971

Error absoluto medio = 11,7091

Estadístico Durbin-Watson = 1,73883 (P=0,0886)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,129932

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre % Reducción y DJ. La ecuación del modelo ajustado es

$$CR_{NO3-} = -34,13 + 0,88 * DJ$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre % Reducción y DJ con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 66,9995% de la variabilidad en reducción. El coeficiente de correlación es igual a 0,818532, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Anejo III. Esquema SLA asociado al sistema de cultivo abierto.

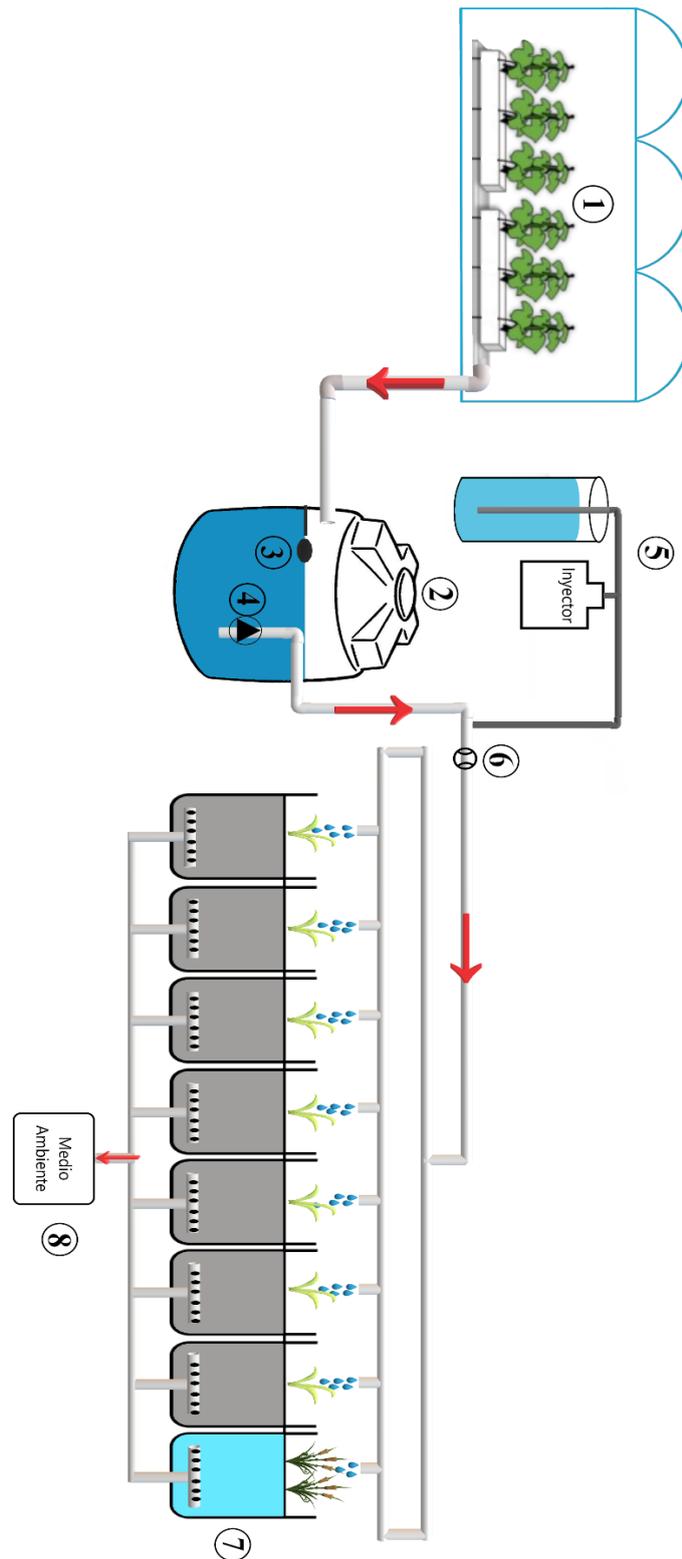


Figura 15. Esquema del SLA asociado a SA.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

En la figura 15 se distinguen los siguientes elementos:

1. Invernadero “Biogreen”. Sistema abierto donde los drenajes no se reutilizan.
2. Depósito de recogida de drenajes. En él se recogen los drenajes del invernadero.
3. Sensor de nivel. Se encuentra en su rango máximo, por lo que está activado el riego de los depósitos que forman el SLA, así como la inyección de acetato.
4. Bomba impulsora, encargada de bombear el agua desde el depósito de recogida de drenajes hacia los depósitos que forman el SLA.
5. Inyector junto con el depósito de acetato sódico. El inyector se encarga de inyectar acetato sódico en el riego del SLA para facilitar la desnitrificación.
6. Caudalímetro. Este se encarga de contabilizar el volumen de drenaje que se depura en el SLA.
7. Depósitos que contienen las plantas, con grava y lixiviados en su interior. Tienen incorporados una tubería perforada en su interior que, junto con el sistema de vasos comunicantes, ayuda a drenar el depósito cuando este rebasa los 60 cm de lixiviados en su interior. De izquierda a derecha los depósitos los componen: *Iris pseudacorus*, *Cyperus longus*, *Halimione portulacoides*, *Phragmites australis*, *Juncus maritimus*, *Scirpus holoschoenus*, *Juncus effusus*, y *Typha domingensis*.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

Anejo IV. Esquemas SLA asociado al sistema de cultivo cerrado.

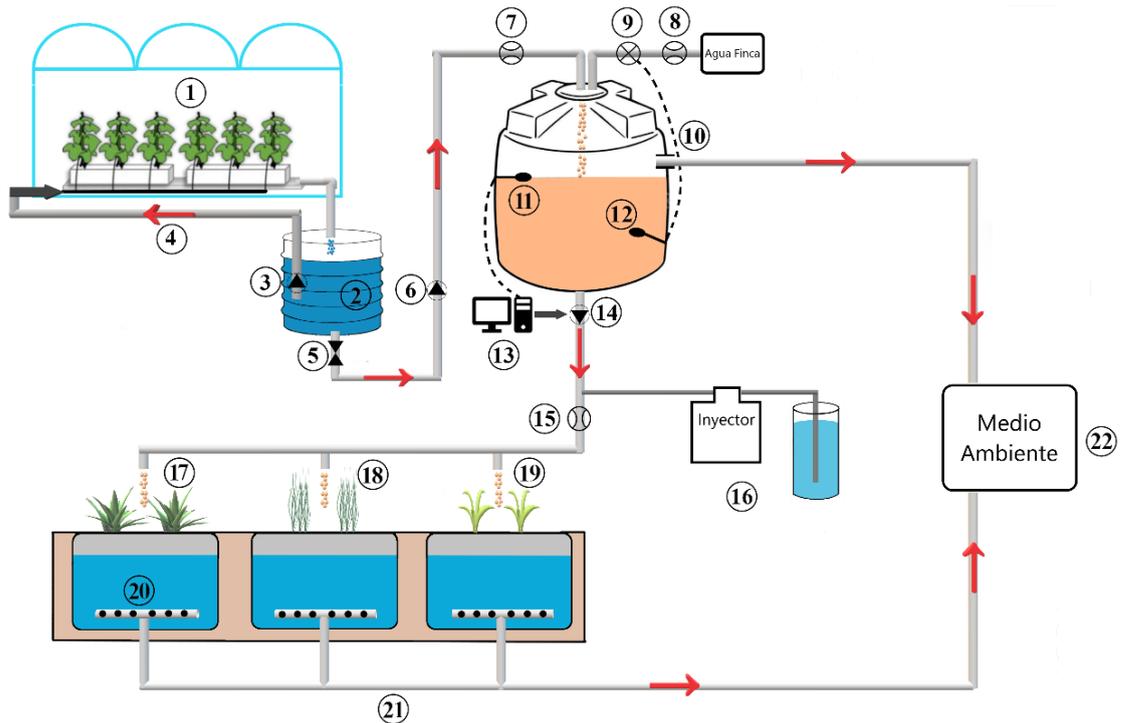


Figura 16. SLA asociado a SC.

En la figura 16 se pueden distinguir los siguientes elementos:

1. Invernadero "C8": sistema cerrado donde se reutilizan los drenajes del cultivo en sucesivos riegos.
2. Depósito de recirculación. El drenaje del cultivo se canaliza hasta este depósito, donde se mezcla con agua de la finca y se ajusta la solución de recirculación con el cabezal de riego.
3. Bomba 1. Impulsa el drenaje que hay en el depósito de recirculación al sistema de recirculación.
4. Sistema de recirculación. Se utiliza el drenaje en sucesivos riegos, ahorrando agua y fertilizantes.
5. Llave de paso. Utilizada cuando se quiere descartar el drenaje contenido en el depósito de recirculación debido a que tiene ya una alta concentración de sales.
6. Bomba 2. Impulsa el drenaje descartado del depósito de recirculación al depósito de descartes.
7. Caudalímetro 1. Contabiliza el volumen de agua que llega al depósito de descartes.
8. Caudalímetro 2. Contabiliza el volumen de agua de la finca que entra al depósito de descartes.

Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados procedentes de la horticultura intensiva.

9. Electroválvula. Controla la apertura del paso de agua de la finca cuando es necesario. Está conectado con el sensor de nivel 2.
10. Aliviadero. Utilizado ante un problema de exceso de volumen dentro del depósito de descartes.
11. Sensor de nivel 1. Se encuentra en su rango superior por lo que está activando el riego de las plantas del SLA. Desactiva el riego cuando se encuentra en su rango inferior (mirando hacia abajo).
12. Sensor de nivel 2. Se encuentra en su rango superior, por lo que no ha activado la entrada de agua de la finca. Está conectado con la electroválvula.
13. Programador de riego. Se encarga de regar de forma automatizada el SLA, activando la bomba 3.
14. Bomba 3. Encargada de bombear el drenaje del depósito de descartes hacia el SLA.
15. Caudalímetro 3. Es el que contabiliza el volumen total que pasa por el SLA. Las lecturas de este caudalímetro son las que se han utilizado para contabilizar el volumen total depurado.
16. Inyector de acetato con depósito de acetato sódico (CH_3COONA).
17. *I. pseudacorus*.
18. *S. holoschoenus*.
19. *C. zizanioides*.
20. Tuberías perforadas en el interior del foso. Permite el drenaje del foso junto con el sistema de vasos comunicantes cuando se rebasa los 60 cm de altura de lixiviados en el interior.
21. Canalizaciones al medio.
22. Medio ambiente donde llega la solución depurada, con una concentración de nitratos tolerable y asimilable por el medio.

**Evaluación de sistemas de lagunaje artificial para la fitodepuración de lixiviados
procedentes de la horticultura intensiva.**



Resumen/Abstract

En Almería hay 3.000 ha de cultivos hortícolas en sustrato, la mayoría de los cuales son sistemas abiertos donde los lixiviados (drenaje del cultivo) producidos no son reutilizados, y suelen ser vertidos al medio ambiente. Esta solución de drenaje contiene altas concentraciones de NO_3^- , PO_4^{3-} y K^+ .

Si se sigue la Directiva de Nitratos de 1991, se declaró en Europa Zonas Vulnerables a la Contaminación por Nitratos (NVZs), donde se incluye las zonas de producción hortícola de Almería. Esta directiva estableció una concentración límite de 50 mg L^{-1} para estas NVZs. Por tanto, los vertidos de lixiviados procedentes del cultivo en sustrato, debido a su alto contenido en NO_3^- no cumple con las reglas establecidas en estas zonas. Ante la creciente tendencia que existe en la horticultura almeriense por minimizar al máximo el impacto ambiental producido por su actividad, en todos sus niveles, se debe apostar por la reutilización y/o tratamiento de los lixiviados. De hecho, se ha hecho uso de la tecnología Cleanleach, desarrollada en el proyecto europeo CLEANLEACH, cuyo propósito inicial era el tratamiento de lixiviados procedentes de plantas ornamentales, mediante un sistema de lagunaje artificial (SLA) con un aporte de carbono que estimula la desnitrificación bacteriana.

Se dispone de un SLA asociado a un sistema de cultivo abierto (SA) donde los lixiviados son vertidos directamente al medio, y a la vez de un SLA asociado a un sistema de cultivo cerrado (SC) donde los lixiviados se recirculan en sucesivos riegos.

Se evaluó la capacidad de reducción de NO_3^- en ambos SLA, obteniendo una eficiencia del 90% en la desnitrificación. Se evaluó también la capacidad de reducción de Na^+ en SLA asociado a SA, donde no se obtuvieron datos concluyentes.

Además, se evaluó la relación entre la reducción de NO_3^- y el tiempo, así como con las variables temperatura, integral de radiación, humedad relativa y volumen depurado. Se obtuvo correlación con las variables en algunas de las plantas que componen los SLA.

Por último, se cuantificó el volumen de lixiviados producido por un sistema de cultivo abierto, frente a uno cerrado, observando como este último generó 4 veces menos que el sistema de cultivo abierto. En consecuencia, un gran ahorro de agua, y menos vertidos al medio.