

Cultivo hidropónico de acelga, aprovechando los nutrientes en el agua residual tratada del campus Puerto Ángel

Berenice Méndez Cruz¹, Mario Alejandro Pérez Ramírez¹, María Nieves Trujillo Tapia² & Eustacio Ramírez Fuentes^{3*}

Resumen

Las plantas de tratamiento de agua residual se crearon con el objetivo de minimizar el impacto ambiental generado por la incorrecta disposición del agua residual al ambiente; además, brindan la oportunidad de emplear el agua residual tratada en diversas actividades, de acuerdo a las características del tratamiento y del efluente. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la viabilidad del efluente de la planta de tratamiento de agua residual de la UMAR campus Puerto Ángel para su aprovechamiento en un cultivo hidropónico de acelgas (*Beta vulgaris* var. *Cicla* L.). Se utilizó un sistema hidropónico de flujo profundo, con dos tratamientos: i) agua residual tratada, y ii) solución nutritiva. Cada tratamiento estuvo conformado por 18 unidades experimentales con una planta de acelga por unidad experimental. El desarrollo de las plantas de acelga se registró por el número de hojas, el tamaño de la hoja y la concentración de clorofila a, b y total. La concentración de coliformes fecales en el agua residual tratada se redujo a <3 el número más probable (NMP/100 mL) posterior a la desinfección y, por lo tanto, estuvo por debajo del límite máximo permisible de 240 NMP/100 mL establecidos por la norma oficial mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1996). Las plantas de acelga presentaron una concentración muy baja de clorofila (0.04 g L⁻¹), y menor número de hojas (6), lo anterior podría ser consecuencia de la baja concentración de NO³-, la temperatura por arriba de 25°C y el déficit de oxígeno (hipoxia); lo cual provocó que las plantas de acelga presentaran desarrollo

Abstract

Wastewater treatment plants were created with the objective of minimizing the environmental impact generated by the improper disposal of wastewater to the environment; in addition, they provide the opportunity to use treated wastewater in various activities, according to the characteristics of the treatment and effluent. The aim of this work was to evaluate the viability of the effluent from the wastewater treatment plant of the UMAR Puerto Ángel campus, for its use in a hydroponic chard cultivation (*Beta vulgaris* var. *Cicla* L.). A deep-flow hydroponic system (DFT) was used, with two treatments: i) treated wastewater, and ii) nutrient solution. Each treatment consisted of 18 experimental units with one chard plant per experimental unit. The development of the chard plants was recorded by the number of leaves, leaf size, and the concentration of chlorophyll a, b and Total. Concentration of fecal coliforms in the treated wastewater was reduced to <3 the most likely number (NMP / 100 mL) after disinfection, and therefore, was below the maximum permissible limit of 240 NMP/100 mL established by mexican official standard (NOM-003-SEMARNAT-1996). The chard plants had a very low concentration of chlorophyll (0.04 g L⁻¹), and a smaller number of leaves (6), this could be a consequence of the low concentration of NO³-, temperature above 25°C and oxygen deficiency (hypoxia); which caused chard plants to have slow development, small leaves and yellowish color. According to the results, we consider that the treated wastewater from the treatment plant

¹ Ingeniería Ambiental, Universidad del Mar campus Puerto Ángel, Oaxaca. Cd. Universitaria s/n, Puerto Ángel 70902, Oaxaca, México.

² Instituto de Ecología, Universidad del Mar campus Puerto Ángel, Oaxaca. Cd. Universitaria s/n, Puerto Ángel 70902, Oaxaca, México.

³ Instituto de Recursos, Universidad del Mar campus Puerto Ángel, Oaxaca. Cd. Universitaria s/n, Puerto Ángel 70902, Oaxaca, México.

* Autor de correspondencia: eustacio@angel.umar.mx (ERF)

lento, hojas pequeñas y color amarillento. De acuerdo con los resultados, consideramos viable el empleo del agua residual tratada proveniente de la planta de tratamiento de la UMAR campus Puerto Ángel, para su uso en sistemas hidropónicos; sin embargo, es necesario suplementarla con una fuente de N.

Palabras clave: Impacto ambiental, nitrógeno, hipoxia, patógenos, contaminación

of the UMAR Puerto Angel campus is viable for use in hydroponic systems; however, it is necessary to supplement it with a source of N.

Key words: Environmental impact, nitrogen, hypoxia, pathogens, pollution..

Recibido: 21 de enero de 2020

Aceptado: 25 de febrero de 2020

Introducción

El agua residual (AR), es el agua de composición variada proveniente de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarias, domésticos y similares, así como la mezcla de ellas (NOM-003-SEMARNAT-1997). En México, las actividades agropecuarias ejercen la mayor presión sobre los recursos hídricos: en 2012 poco más del 76% del agua concesionada se utilizó en el riego para actividades ganaderas y acuícolas; a su vez, los centros urbanos descargaron aproximadamente 7.3 hectómetros cúbicos (equivalente a 229.73 m³/s) de aguas residuales (CONAGUA 2014).

La descarga de aguas residuales domésticas e industriales sin un proceso de tratamiento para reducir la concentración de los contaminantes que contienen (incluyendo microorganismos patógenos), afectan negativamente a los seres vivos y al ambiente que les rodea; provocando problemas de toxicidad, infecciones, contaminación térmica (elevan la temperatura de las zonas donde se desechan) y malos olores, entre otros (INCyTU 2019).

El tratamiento del agua residual se fundamenta en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, que buscan disminuir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos totales (SST), microorganismos patógenos, nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y sustancias orgánicas disueltas (Jiménez-Cisneros 2001). Para lo anterior, se han diseñado e implementado plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), las cuales, después del tratamiento del AR, brindan la

oportunidad de emplear el agua residual tratada (ART) en otras actividades de acuerdo a las características del tratamiento y del efluente.

En el campus Puerto Ángel de la UMAR, se desarrolló e instaló un sistema de tratamiento de agua residual doméstica (PTAR-UMAR-CPA), ubicada a un costado de los laboratorios de Ingeniería Ambiental; la PTAR está estructurada con: 1) un sedimentador primario, empleado para remover la materia orgánica y los sólidos gruesos sedimentables; 2) tres tanques de almacenamiento, de los cuales uno es destinado para recirculación; 3) tres reactores anaerobios de flujo ascendente, cada uno con un gasto de 50 L h⁻¹; 4) un humedal de flujo sub-superficial cuyo principal objetivo es la eliminación de nutrientes por medio de plantas de Tule (*Thypha latifolia*) y lirios acuáticos (*Eichhornia crassipes*); y 5) tanque de almacenamiento del efluente proveniente del humedal.

La PTAR-UMAR-CPA se ha convertido en un elemento de interés de investigación, para el área de Ingeniería Ambiental, enfocándose en mejorar el proceso de tratamiento. Valencia (2009) y Santos (2011), propusieron el diseño, construcción y caracterización a nivel piloto de un sistema anaerobio-fotocatalítico para mejorar la eficiencia del proceso de la PTAR. De los resultados obtenidos en dichos trabajos se determinó que la concentración de coliformes fecales está por arriba del límite máximo permisible (LMP) de 2000 NMP/100 mL para empleo en riego (NOM-001-SEMARNAT-1996); por lo tanto, se requiere de una desinfección previa del ART antes de su uso.

De acuerdo al Programa Nacional Hídrico (2014-2018), la utilización del ART representa una alternativa para hacer más eficiente la administración del recurso hídrico, debido a que solo el 33% del efluente tratado es aprovechado. La NOM-003-SEMARNAT-1997 establece que el ART puede ser utilizada en servicios al público en contacto directo, indirecto u ocasional; si bien la norma no hace referencia al uso del ART en la producción de cultivos; consideramos que el uso del ART en hidroponía, es una alternativa viable, por el aporte de nutrientes inorgánicos a las plantas, mejorando el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo como el frijol (Isea *et al.* 2004), pepino (Morrillo 2008) y tomate (Navarro-López 2010).

La hidroponía etimológicamente significa “trabajo en agua” (RAE 2019); es una forma de cultivo en donde se emplean sustratos diferentes al suelo natural, y las raíces de las plantas entran en contacto directo con una solución nutritiva (SN) como fuente de nutrientes que permiten su desarrollo.

En el presente trabajo, el objetivo fue probar la viabilidad del empleo del ART (PTAR-UMAR-CPA), aprovechando sus nutrientes para el cultivo de acelgas en un sistema hidropónico comparándolo con un cultivo hidropónico tradicional, el cual emplea una solución nutritiva (minerales inorgánicos).

Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en el invernadero de Biotecnología Ambiental, ubicado junto al humedal, a un costado de la planta piloto de Ingeniería Ambiental. Se diseñó e implementó un sistema hidropónico de bloques al azar con dos tratamientos: i) solución nutritiva, y ii) agua residual tratada; cada tratamiento consistió de 18 plantas o unidades experimentales, mismas que se consideraron como repeticiones. El contenido nutrimental de la SN comercial (Tabla I), y la caracterización físico-química y microbiológica del ART (Tabla II) sirvieron para comparar los dos tratamientos, considerando el aporte nutrimental de cada uno.

El sistema hidropónico empleado fue de flujo profundo (DFT, por sus siglas en inglés), constituido por tres componentes principales: 1) sistema de aireación, 2) cárcamo de bombeo (capacidad de 200 L en cada línea), y 3) canales de cultivo (dos tubos de PVC por cada sección) (Fig. 1).

Para proveer de aireación al sistema se utilizó un compresor (Thomas 5030-A) conectado a un tubo de PVC (1.70 m de longitud, con un diámetro de 2.54 cm) y se le acondicionaron 3 válvulas de metal con 2 salidas c/u y 6 mangueras (diámetro de 0.63 cm), una para cada tubo de PVC; el flujo de aire fue de 56.6 L min⁻¹ en cada sección. Por otra parte, para el suministro de la SN y el ART (respectivamente), se utilizó una bomba sumergible (Aquasub, modelo 4213) que suministró al sistema 5 L min⁻¹, el cual se programó con un temporizador: se encendía la bomba durante un minuto cada hora -durante el día- y cada dos horas por la noche.

Los canales de cultivo en cada sección (Fig. 1), se conformaron por dos tubos de PVC, cada uno con un diámetro de 10.16 cm y una longitud de 2 m (volumen de 9.5 L), en los que se hicieron perforaciones de 4.44 cm de diámetro con una distancia de 16.5 cm entre cada perforación. Para darle soporte a la planta se emplearon canastillas hidropónicas, cuentan con abertura entre las rejillas y permiten el contacto directo de la raíz con el sustrato (SN y ART) para la absorción de nutrientes.

Tabla I. Contenido nutrimental de la solución nutritiva comercial Hydroenvironment.

NUTRIENTE	%
N	10
P	8
K	18
S	2.5
Mg	1.8
Ca	5.9
Fe	0.1
Be	0.002
Zn	0.01
Cu	0.0002
Mn	0.002

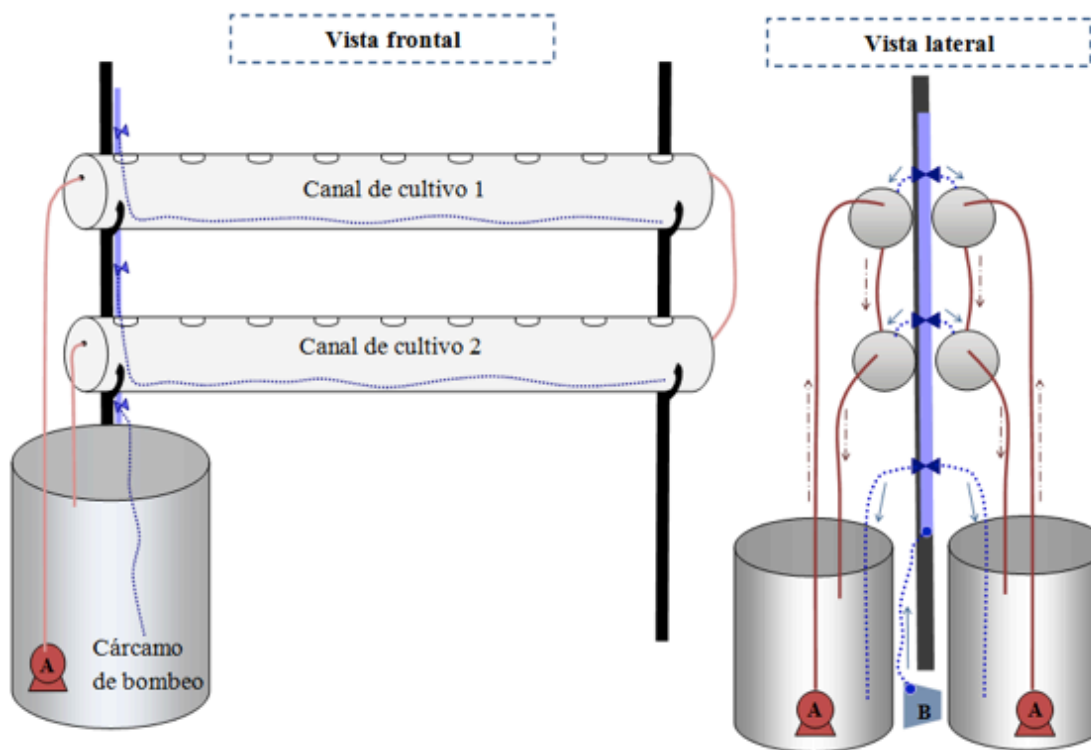


Figura 1. Estructura del sistema hidropónico tipo flujo profundo (DFT): vista frontal y lateral; la línea azul punteada, representan la circulación del aire inyectado; la línea roja, representan el suministro de la SN y el ART, respectivamente.

Tabla II. Caracterización del agua residual tratada antes (ARTa) y después del acondicionamiento (ART) de la PTAR-UMAR-CPA.

Característica	ARTa	ART	LMP
DQO (mg L ⁻¹)	65.87	50.67	NE
SST (mg L ⁻¹)	73.33	46.67	20*
Grasas y aceites (mg L ⁻¹)	7.7	7.7	15*
Huevos de helminto (huevos L ⁻¹)	7	0	≤1*
Coliformes fecales (NMP 100mL ⁻¹)	>1100	<3	240*
Zn (mg L ⁻¹)	0.0492	ND	20**
Cu (mg L ⁻¹)	0.0474	ND	4**

LMP: Límite Máximo Permissible; ND: No determinado; NE3: No establecido en la Normatividad Mexicana.
 * NOM-003-SEMARNAT-1997; ** NOM-001-SEMARNAT-1996.

Desinfección, Acondicionamiento y Caracterización Físico-Química del ART

El ART que se utilizó en la presente investigación, es la que proviene de la PTAR-UMAR-CPA; previo a su uso, se realizó una desinfección química (cloración), la cual consistió en adicionar 10 ml de hipoclorito de sodio

(NaClO) por cada litro de ART; se dejó reposar durante 24 h y transcurrido el tiempo se agregaron 13.8 g de tiosulfato de sodio (Na₂O₃S₂), se dejó en aireación durante 24 h. La cloración es la técnica de desinfección más aplicada a nivel mundial, por su efectividad y bajo costo (Sam van Haute *et al.* 2015). La caracterización

del ART se conformó por una serie de análisis: a) coliformes fecales, b) huevos de Helminto, c) Demanda Química de oxígeno (DQO), d) Sólidos Suspendedos Totales (SST), e) grasas y aceites, y f) metales pesados -Zn y Cu- (NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-001-SEMARNAT-1996).

Germinación y trasplante de la acelga (*Beta vulgaris* var. *Cicla* L)

Para promover la germinación, las semillas de acelga se remojaron durante 12 h, posteriormente se colocaron en una charola rellena de sustrato (compuesto de 40% perlita y 60% fibra de coco). La germinación se produjo 6 días después de la siembra y las plántulas fueron trasplantadas, tras el desarrollo de su primer hoja verdadera, a bolsas plásticas (8 cm x 11.4 cm) con 20 g de sustrato para su crecimiento; el trasplante al sistema hidropónico fue a los 24 días después de su siembra.

Monitoreo de las condiciones del sistema

Los parámetros de pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura (°C) se registraron diario a la misma hora durante el experimento (39 días), utilizando un medidor multiparamétrico para calidad del agua (Hanna Instruments, HI 9828). El registro de los nutrientes en la SN y ART: NO_3^- , NH_4^+ , P_2O_2 , K^+ , Ca_2^+ , Mg_2^+ y SO_4^{2-} , se realizó semanalmente, con la finalidad de determinar la relación de dichos nutrientes con el desarrollo vegetativo de las plantas. Los nutrientes fueron cuantificados con un analizador para nutrientes en Agricultura de Hanna Instruments (HI 83225).

El desarrollo de las plantas se monitoreo semanalmente considerando la altura de planta y número de hojas. Al finalizar el experimento, se cosecharon las plantas de acelga y se cuantificó la clorofila por ser una medida indirecta de la actividad fotosintética de las plantas¹ (Pérez-Urria 2009).

Los resultados se analizaron por ANDEVA

usando el software Estadística 7, para comparar los tratamientos: SN *vs* ART.

Resultados

Caracterización del ART

Con base en los antecedentes establecidos por Santos (2011) y Valencia (2009), el ART proveniente del efluente de la PTAR-UMAR-CPA fue desinfectada y posteriormente se caracterizó para verificar el cumplimiento de la normatividad (Tabla II).

El grupo de coliformes son constantes, abundantes y casi exclusivos de la materia fecal, razón por la cual son indicadores de calidad del agua. La concentración de coliformes fecales en el ART fue <3 NMP/100 mL, estuvo por debajo del LMP de 240 NMP/100mL establecidos en la NOM-003-SEMARNAT-1996; de igual forma, está dentro de la calidad del ART empleada en riego (≤ 1000 NMP/100 mL) establecidas por la OMS (Ayres & Durcan 1996) y las establecidas por la FAO (< 14 NMP/100 mL) (Jorge *et al.* 2008).

La concentración de metales pesados en el ART estuvo por debajo del LMP (Tabla II); por otra parte, la concentración de SST en el ART superó los LMP (20 mg L⁻¹) establecidos en la normatividad (NOM-003-SEMARNAT-1997).

Monitoreo de parámetros físicos, químicos y nutrimentales en la SN y ART

De los parámetros monitoreados en la SN y ART; el pH, T°C y NH_4^+ , no mostraron diferencias significativas entre tratamiento (SN y ART) (Tabla III); en el caso de la CE, NO_3^- , P_2O_2 , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} y SO_4^{2-} ; se registraron diferencias significativas entre los tratamientos: SN $>$ ART (Tabla III).

Desarrollo de la acelga

Para evaluar el desarrollo de la acelga en los diferentes tratamientos, de forma semanal se

¹ Todos los organismos con capacidad fotosintética contienen uno o más pigmentos (clorofilas y carotenoides) capaces de absorber radiación visible que desencadena las reacciones fotoquímicas de la fotosíntesis.

monitorearon el número y tamaño de hojas (Tablas IV); y al finalizar el periodo experimental se cuantificó la concentración de clorofila a, b y Total (Figura 2).

El análisis estadístico (ANDEVA) demostró que no existe diferencia significativa entre el tamaño de hojas ($F(5,170) = 12.289$, $p = 0.00005$). El número de hojas en el ART fue mayor con respecto a la SN y fue significativamente diferente ($F(5,170) = 1.2594$, $p = 0.2837$). La concentración de clorofila a, b y Total fue superior en ART vs SN en 48, 61 y 52%, respectivamente (Figura 3); pero sin ser significativamente diferentes (estadísticamente).

Discusión

Los huevos de helminto son indicadores biológicos de calidad del agua por el riesgo que representan para la salud humana. Los huevos es la etapa contagiosa de los parásitos, son excretados en las heces y se extiende en AR, suelo o en alimentos. En el ART se detectó la presencia de huevos de helminto (7 huevos L⁻¹), esta concentración supera los estándares

de calidad del ART empleada en la agricultura según la normatividad mexicana, OMS (Ayres & Durcan 1996) y FAO (Jorge *et al.* 2008); quienes determinan que la presencia de huevos de helminto debe ser ≤ 1 huevo L⁻¹. Organismos internacionales como la FAO y OMS dan mayor importancia a las características biológicas para establecer estándares de calidad del AR y ART, porque la problemática del agua ha llevado a emplear AR cruda, tratada o semitratada en actividades agrícolas, generando un riesgo en la salud de los consumidores y productores. El acondicionamiento del ART de la PTAR-UMAR-CPA, posterior a la desinfección, redujo la concentración de coliformes fecales a < 3 NMP/100 mL y de huevos de helminto a menos de ≤ 1 huevo L⁻¹, permitiendo cumplir los estándares de calidad de la normatividad mexicana, EPA, OMS y FAO.

Los metales analizados Zn y Cu, son necesarios en procesos bioquímicos de las plantas. La concentración de Zn y Cu en el ART fue de 0.0492 y 0.0474 mg L⁻¹, respectivamente; Favela-Chávez *et al.* (2006), determinaron que en solución nutritiva el Zn y Cu son necesarios

Tabla III. Resumen de características de la SN y ART. Los valores son el promedio general (\pm desviación estándar) para cada característica.

Característica	Tratamientos		
	SN	ART	SNU*
CE (mS cm ⁻¹)	3.04 \pm 0.55	1.61** \pm 0.01	-
pH	6.32 \pm 0.10	6.31 ^{ns} \pm 0.10	-
T (°C)	27.5 \pm 0.28	27.7 ^{ns} \pm 0.31	-
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	430.7 \pm 15.4	144.5** \pm 15.7	1116
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	5.7 \pm 0.72	8.3 ^{ns} \pm 2.3	-
P ₂ O ₅ (mg L ⁻¹)	109.2 \pm 11.5	32.9** \pm 0.95	9.7
K ⁺ (mg L ⁻¹)	234.6 \pm 26.3	37.3** \pm 5.8	296
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	111.5 \pm 3.7	92.2** \pm 3.2	224
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	46 \pm 1.4	23.3** \pm 0.7	14.4
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	120.1 \pm 7.9	57.0** \pm 0.3	91.2

* SNU (solución nutritiva universal), valores para cultivos de hojas de rápido crecimiento (Favela *et al.* 2006).

** Diferencia significativa entre la SN y ART. ns = No existe diferencia significativa entre SN y ART.

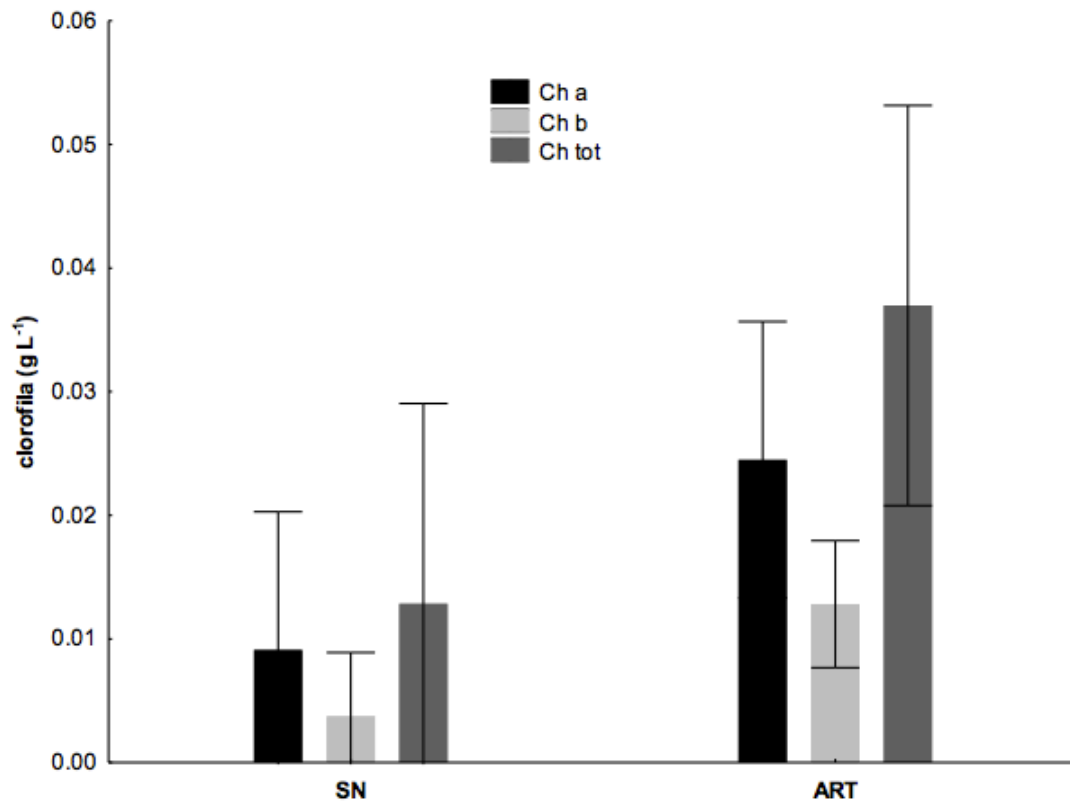


Figura 2. Concentración de clorofila a, b y Total en las hojas de acelga cosechadas en los tratamientos evaluados: solución nutritiva (SN) y agua residual tratada (ART).

Tabla IV. Desarrollo vegetal de las acelgas, medido por el número de hojas y tamaño de las hojas (cm), en los tratamientos de SN y ART. Los valores son el promedio de las 18 repeticiones para cada día y su desviación estándar.

Día	SN		ART	
	# hojas	Tamaño de hoja (cm)	# hojas	Tamaño de hoja (cm)
3	3.9 ± 0.23	13.0 ± 0.74	4.0 ± 0.23	13.5 ± 0.74
11	4.1 ± 0.23	14.6 ± 0.82	4.6 ± 0.23	15.5 ± 0.83
18	4.8 ± 0.21	15.8 ± 0.75	5.8 ± 0.21	15.9 ± 0.74
25	5.3 ± 0.30	16.6 ± 0.79	6.9 ± 0.30	17.6 ± 0.80
32	5.4 ± 0.56	17.3 ± 0.79	8.4 ± 0.56	18.0 ± 0.79
39	5.7 ± 0.55	17.4 ± 0.85	9.7 ± 0.55	18.7 ± 0.83
*	4.9 ± 0.26**	15.8 ± 0.71 ^{ns}	6.6 ± 0.25	16.5 ± 0.72

*Promedio general total para cada tratamiento y variable (# hojas y tamaño de hoja).

**Diferencia significativa entre la SN y ART. ns = No existe diferencia significativa entre SN y ART.



Figura 3. Plantas de acelgas (*Beta vulgaris* var. *Cicla* L) desarrolladas en el sistema hidropónico: A) tratamiento con SN, y B) tratamiento con ART.

para el desarrollo vegetal en concentraciones de 0.1-0.6 mg L⁻¹ y 0.01-0.06 mg L⁻¹; respectivamente. De acuerdo a lo anterior, únicamente la concentración de Cu en el ART es considerada apropiada para el desarrollo vegetal en un medio hidropónico.

El acondicionamiento del ART disminuyó la concentración de SST en un 36.35%; sin embargo, no cumple con los LMP. Actualmente la EPA, la FAO y OMS no consideran la concentración de SST como determinante de la calidad del ART. La concentración de grasas y aceites en el ART fue de 7.7 mg L⁻¹, se encuentra por debajo de LMP 15 mg L⁻¹ (NOM-003-SEMARNAT-1997); y la baja concentración se debe al tipo de agua residual doméstica.

Monitoreo de parámetros químicos y nutricionales en la SN y ART

La CE indica el contenido de sales disueltas y su incremento induce a una deficiencia hídrica, debido al aumento de la presión osmótica, ocasionando un desbalance nutricional, principalmente en los iones que se mueven por flujo de masas como el Ca₂⁺ y

Mg₂⁺ (Favela-Chávez *et al.* 2006; Samarakoon *et al.* 2006). La CE fue mayor y significativamente diferente en la SN comparada al ART; sin embargo, el valor de la CE se encuentra en el intervalo de tolerancia de la acelga, debido a que la acelga es una planta tolerante a la salinidad en cultivo hidropónico (Resh 1995); por lo tanto, en las condiciones del experimento, la CE no es un factor limitante en el crecimiento de las plantas de acelga.

La FAO establece que el intervalo normal del pH para el agua de riego es de 6.5 a 8.5, por lo que, el ART empleada cumple con las características establecidas (Ayers & Wescot 1985). El valor promedio de pH fue de 6.3 para ambos tratamientos, Furlani (1999) menciona que el intervalo de pH adecuado para el crecimiento vegetal en sistemas hidropónicos es de 5.5 a 6.5. Durante el periodo del experimento se registraron fluctuaciones en el pH de 5.38 hasta 7.7; la fluctuación es debida a la absorción de iones por las plantas (Marchner 2012).

El clima cálido del lugar (Puerto Ángel), influyó en el desarrollo de las plantas de acelga; la temperatura promedio de la SN y ART fue de 27°C (para ambos). Suhl *et al.*

(2019), reportaron una correlación negativa (-0.773) entre la temperatura *vs* concentración de oxígeno, en un sistema hidropónico y de acuaponía; con el aumento de la temperatura la concentración de oxígeno disminuye. En el presente trabajo no se registró la concentración de oxígeno, sin embargo, consideramos que la temperatura (mayor a 25°C) fue un factor determinante en el desarrollo de las plantas de acelga, debido al déficit de oxígeno (hipoxia) en la raíz de las plantas; lo anterior, trae como consecuencia la disminución en la absorción de agua (Morard *et al.* 2000) y de nutrientes esenciales (Stepniewski & Przywara 1992).

La concentración promedio de NO_3^- en la SN y ART fue de 430.7 y 144.5 mg L⁻¹, respectivamente; ambos valores se encuentran por debajo de la concentración reportada como adecuada de 1166 mg L⁻¹ para cultivos de hojas de rápido crecimiento (Favela-Chávez *et al.* 2006), en donde se incluye a la acelga. Los síntomas que reportan para las plantas con baja disponibilidad de N son (entre otros) desarrollo lento, hojas pequeñas y de color amarillento, plantas débiles (Alcántar-González *et al.* 2016); mismos síntomas que se observaron en las plantas de acelga en nuestro sistema; debido a la combinación tanto de la deficiencia de N, así como, del déficit de oxígeno (hipoxia).

La concentración de NH_4^+ en ambos sistemas (Tabla III) estuvo por debajo de la concentración reportada para una SN. La baja concentración de este catión es debido a que es considerado tóxico para el desarrollo vegetativo; por ello, la solución nutritiva que se emplea posee concentraciones bajas, inferiores a 2 mmol L⁻¹ (Rodríguez de la Rocha 2002).

La concentración promedio de fosfato asimilable (P_2O_5) en el ART fue de 26.7 mg L⁻¹; dicho valor es mayor en 2.7 veces a la concentración de P_2O_5 necesaria en una solución nutritiva para el cultivo de hojas -9.7 mg L⁻¹ (Favela-Chávez *et al.* 2006). El fósforo es uno de los nutrientes altamente dependientes del pH, y su disponibilidad se ve reducida a un pH inferior a 6.5; como consecuencia se incrementa la solubilidad del hierro y aluminio precipitando en fosfatos insolubles; por ello,

el intervalo en el que se tiene la máxima disponibilidad del fósforo es en un medio con un pH de 6.5 a 7 (Trejo-Téllez & Gómez-Merino 2012).

Los cationes como el K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} están fuertemente relacionados, debido a que, la proporción de estos cationes en el medio determina si se desarrolla una relación de sinergismo o antagonismo entre los mismos. Cuando las relaciones $\frac{\text{K}^+}{\text{Mg}^{2+}}$ y $\frac{\text{K}^+}{\text{Ca}^{2+}}$, expresadas en meq L⁻¹, son superiores a la unidad y la relación $\frac{\text{Ca}^{2+}}{\text{Mg}^{2+}}$ es superior a 10, existe la posibilidad de desarrollar antagonismos (Navarro Blaya & Navarro-García 2003); sin embargo, no fue el caso en ninguno de los tratamientos (SN y ART) de nuestro sistema.

En el desarrollo de las plantas de acelga con la SN y ART, únicamente se registró diferencia significativa en el número de hojas: ART > SN; en el tamaño de hoja y concentración de clorofila a, b y Total, no se presentaron diferencias. El número de hojas (promedio 6) y la concentración de clorofila total (máximo 0.04 g L⁻¹) en las plantas de acelga se encuentran por debajo de lo reportado por Mahlagu *et al.* (2016); en su trabajo obtuvieron en promedio 13 hojas por planta, y una concentración de clorofila total promedio de 1.3 g L⁻¹; ellos trabajaron con lechuga (*Lactuca sativa* L.); si bien, no es la misma especie a la nuestra, ambas especies son de hojas de rápido crecimiento. La disponibilidad del N en las plantas es de suma importancia; un adecuado suministro de N promueve un mayor número de hojas y área foliar, que contribuye a aumentar la capacidad fotosintética de la planta (Tei *et al.* 2002), lo cual se ve reflejado en la concentración de clorofila.

Conclusiones

El ART tiene el potencial de ser utilizada como fuente alternativa de agua en cultivos hidropónicos, sin generar daño a las plantas. Sin embargo, se recomienda en futuros trabajos suplementar al ART con los elementos minerales (principalmente NO_3^- y NH_4^+) necesarios para satisfacer los requerimientos nutricionales de las plantas y obtener un mejor desarrollo

foliar. En el aspecto ambiental, con el aprovechamiento de ART en actividades agrícolas se puede reducir el impacto ambiental, disminuyendo la presión hídrica y el empleo de fertilizantes químicos.

Agradecimientos

Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el apoyo financiero para el proyecto. A la técnico de los laboratorios de Ingeniería Ambiental, Coral Edith Mirón Enriquez por su apoyo en el análisis de las muestras. A los revisores, por sus valiosos comentarios que contribuyeron a mejorar el manuscrito.

Referencias

- Alcántar-González, G., L. Trejo-Tellez & F. C. Gómez-Merino. 2016. Nutrición de cultivos. Biblioteca Básica de Agricultura, 2ª Ed. México, 443 pp.
- Ayers, R. & D. Wescot. 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 9(1): 174.
- Ayres, R. M. & M. D. Durcan. 1996. Analysis of Wastewater for Use In Agriculture: A Laboratory Manual of Parasitological and bacteriological Techniques. Geneva: World Health Organization.
- CONAGUA. 2014. Estadísticas del agua. México: Comisión Nacional del Agua.
- Favela-Chávez, E., P. Preciado-Rangel & A. Benavides-Mendoza. 2006. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Torreón, Coahuila, México: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Furlani, P. R. 1999. Hydroponic vegetable production in Brazil. *Acta Horti*, 481: 777-778.
- Gobierno de la República. 2013. Plan Nacional del Desarrollo 2014-2018. Programa Nacional Hídrico, 139. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión del Agua.
- Hanna Instruments. 2010. HI 83225 Grow master for Nutrient Analyses. Romania: Hanna Instruments Inc.
- Hydroenvironment. 2015. Hydroenvironment. Recuperado de: http://hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=55
- Isea, D., G. Quintero, A. Higuera, L. Vargas, J. Durán & J. Delgado. 2004. Elementos esenciales del agua residual tratada sobre el contenido de nutrientes en frijol *Vigna unguiculata* (L.) Walp, cultivado en hidroponía. 4. Venezuela: Centro de Investigación del Agua.
- Jiménez-Cisneros, B. 2001. La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Editorial Limusa. 926 pp.
- Jorge, S., P. Torres & C. Madera. 2008. Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana* 26(2): 347-359.
- Mahlagu, R. I. S., M. M. Maboko, D. Sivakumar, P. Soundy & J. Jifon. 2016. Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, yield and quality response to nitrogen fertilization in a non-circulating hydroponic system. *Journal of Plant Nutrition*, 39(12): 1766-1775.
- Marchner, P. 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants, 3rd ed. Academic Press, London pp. 651.
- Morard, P., L. Lacoste & J. Silvestre. 2000. Effect of oxygen deficiency on uptake of water and mineral nutrients by tomato plants in soilless culture. *J. Plant Nutr.* 23: 1063-1078.
- Morrillo, G. 2008. Uso de aguas residuales tratadas en el desarrollo de cultivos hidropónicos. 8. Venezuela: Centro de Investigación del Agua.
- Navarro-Blaya, S. & G. Navarro-García. 2003. Química Agrícola (Segunda ed.). Madrid: Ediciones Mundi Prensa.
- Navarro-López, E. R. 2010. Uso de agua residual en la producción de tomate hidropónico en invernadero. 105. Estado de México, México: Universidad Autónoma Chapingo.

- Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión (INCyTU). 2019. Ciudad de México. 6 pp.
- Pérez-Urria, E. C. 2009. Fotosíntesis: Aspectos Básicos. *Reduca (Biología)*. Serie Fisiología Vegetal, 2(3): 1-47.
- RAE. 2019. Diccionario de la real academia española, 23 Edición. Recuperado de <http://dlr.rae.es/?id=KLUyCbV>
- Resh, H. M. 1995. *Cultivos hidropónicos*, 4th ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Rodríguez de la Rocha, S. 2002. *Hidroponía: Agricultura y Bienestar*. Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Samarakoon, U., P. Weerasinghe & A. Weerakkody. 2006. Effect of Electrical Conductivity [EC] of the Nutrient Solution on Nutrient Uptake, Growth and Yield of Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L.) in Stationary Culture. *Tropical Agricultural Research* 18(1): 13-21.
- Sam van Haute, I. Sampers, L. Jacxsens & M. Uyttendaele. 2015. Selection criteria for water disinfection techniques in agricultural practices. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55: 1529-1551.
- Santos-Santos, C. 2011. Escalamiento, construcción y caracterización de un reactor fotocatalítico solar para la desinfección de aguas residuales con un gasto de 100 L h⁻¹. Tesis de Maestría. Universidad del Mar, Campus Puerto Ángel. Oaxaca, México.
- SEMARNAT. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. 18. México: SEMARNAT.
- SEMARNAT. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los Límites Máximos Permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. 35. México: SEMARNAT.
- Stepniewski, W. & G. Przywara. 1992. The influence of soil oxygen availability on yield and nutrient uptake (N, P, K, Ca, Mg, Na) by winter rye (*Secale cereale*). *Plant Soil* 143: 267-274.
- Suhl, J., B. Oppedijk, D. Baganz, W. Kloas, U. Schmidt & B. van Duijn. 2019. Oxygen consumption in recirculating nutrient film technique in aquaponics. *Scientia Horticulture*, 255: 281-291.
- Tei, F., P. Benincasa & M. Guiducci. 2002. Critical nitrogen concentration in processing tomato. *European Journal of Agronomy*, 18: 45-55.
- Trejo-Téllez, L. & F. Gómez-Merino. 2012. *Nutrient Solutions for Hydroponic Systems*. (Toshiki Asao, Ed.). A Standard Methodology for Plant Biological Researches.
- Valencia-Rojas, E. 2009. Diseño, construcción y caracterización a nivel piloto de un sistema anaerobio-fotocatalítico para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de Maestría. Universidad del Mar, Campus Puerto Ángel. Oaxaca, México.

UNIVERSIDAD DEL MAR

Campus Huatulco

División de Estudios de Posgrado



Maestría en Relaciones Internacionales: Medio Ambiente

Líneas de Investigación:

- Conflictos Internacionales y Medio Ambiente
- Consecuencias socio-ambientales del cambio climático
- Delitos ambientales internacionales
- Legislación y normatividad internacional
- Política ambiental internacional



Maestría en Mercadotecnia Turística

Líneas de Investigación:

- Nuevas Tendencias del Turismo
- Mercadotecnia de Destinos Turísticos
- Perfil del Turista en Bahías de Huatulco
- Ética del Turismo



Maestría en Derecho Internacional Penal

Líneas de Investigación:

- Crímenes Internacionales
- Jurisdicción Universal
- Instancias Internacionales y Procedimientos Penales Internacionales
- Problemas Actuales de Derecho Internacional Penal, Dogmática y Perspectiva Político-Criminal
- Responsabilidad Internacional por Incumplimiento al Derecho Humanitario

Informes

Dr. Miguel Ángel Ahumada Sempoal
Jefe de la División de Estudios de Posgrado
Tel. (958) 584 3057 Ext. 111
Fax. (958) 584 3078
posgrado@huatulco.umar.mx

www.umar.mx