

## Aplicación de extractos de algas, NP'SZnO y microorganismos sobre la biomasa vegetal en tomate

### Application of extracts of seaweed, NP'SZnO and microorganisms on the plant biomass in tomato

Raúl Morales-Meléndez<sup>1</sup>   
Rebeca Betancourt-Galindo<sup>2</sup>   
Antonio Juárez-Maldonado<sup>3</sup>   
Armando Hernández-Pérez<sup>4</sup>   
José Antonio González-Fuentes<sup>4</sup>   
Bertha Puente-Urbina<sup>2</sup>   
Alonso Méndez-López<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup>Estudiante de la Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro No. 1923, CP. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup>Departamento de Materiales Avanzados, Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Enrique Reyna H. No. 140, San José de los Cerritos, CP. 25294. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>3</sup>Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro No. 1923, CP. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>4</sup>Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro No. 1923, CP. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

\* Autor de correspondencia:  
alonso.mendez@uaaan.edu.mx

#### Artículo científico

Recibido: 22 de noviembre 2021

Aceptado: 11 de mayo 2023

**Como citar:** Morales-Meléndez R, Betancourt-Galindo R, Juárez-Maldonado A, Hernández-Pérez A, González-Fuentes JA, Puente-Urbina B, Méndez-López A (2023) Aplicación de extractos de algas, NP'SZnO y microorganismos sobre la biomasa vegetal en tomate. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 10(2): e3206. DOI: 10.19136/era.a10n2.3206

**RESUMEN.** La agricultura enfrenta serios desafíos que demandan la producción de una mayor cantidad de alimentos para las generaciones presentes y futuras, aunado a esto los factores bióticos y abiótico cada vez afectan los rendimientos de los cultivos, ante esta problemática, los bioestimulantes son una alternativa. El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de la aplicación foliar de extracto de algas (EA = 0, 500, 2 500 ppm), nanopartículas de óxido de zinc (NP'SZnO = 0, 50 y 250 mg L<sup>-1</sup>) y la coinoculación del sustrato con microorganismos rizosféricos (sin microorganismos [SMos] y con microorganismos empapados en el sustrato [CMos = 10 esporas mL<sup>-1</sup> de *Glomus intraradices* y 1x10<sup>6</sup> UFC de *Azospirillum brasilense*) sobre la acumulación de la biomasa en plantas de tomate. El experimento se estableció bajo un diseño de bloques al azar con arreglo factorial (3x3x2), con ocho repeticiones. El análisis de varianza identificó diferencias significativas entre los tratamientos, los factores analizados y las interacciones respectivas. Las aspersiones con EA mejoraron el peso seco de tallo (PST), biomasa de tallo (BT) y biomasa radicular (BR); mientras que, la aspersión con NP'SZnO incrementó el peso fresco radicular (PFR), peso seco de hoja (PSH), peso seco radicular (PSR), biomasa de hoja (BH) y BR; en tanto que, la coinoculación del suelo con microorganismos (CMos) mejoró el peso fresco de hoja (PFH), PSR y BR. La aplicación de los bioestimulantes mostró efecto estimulante sobre el crecimiento vegetativo de las plantas de tomate.

**Palabras clave:** *Ascophyllum nodosum*, bioestimulantes, crecimiento vegetativo, microorganismos, nanopartículas.

**ABSTRACT.** Agriculture faces serious challenges that demand the production of a greater amount of food for present and future generations, coupled with this, biotic and abiotic factors increasingly affect crop yields, given this problem, biostimulants are an alternative. The aim of this study was to determine the effect of foliar application of seaweed extract (EA = 0, 500, 2 500 ppm) and zinc oxide nanoparticles (NP'SZnO = 0, 50 and 250 mg L<sup>-1</sup>) and coinoculation of the substrate with rhizospheric microorganisms (without microorganisms [SMos] and with microorganisms soaked in the substrate [CMos = 10 spores mL<sup>-1</sup> of *Glomus intraradices* and 1x10<sup>6</sup> CFU of *Azospirillum brasilense*) on the accumulation of biomass in tomato plants. The experiment was established under a randomized block design with a factorial arrangement (3x3x2), with eight repetitions. The analysis of variance identified significant differences between the treatments, the factors analyzed and the respective interactions. EA sprays improved stem dry weight (PST), stem biomass (BT) and root biomass (BR); while, spraying with NP'SZnO increased root fresh weight (PFR), leaf dry weight (PSH), root dry weight (PSR), leaf biomass (BH) and BR; whereas, the co-inoculation of the soil with microorganisms (CMos) improved the fresh leaf weight (PFH), PSR and BR. The application of biostimulants showed a stimulating effect on the vegetative growth of tomato plants.

**Key words:** *Ascophyllum nodosum*, biostimulants, vegetative growth, microorganisms, nanoparticles.

## INTRODUCCIÓN

La agricultura mundial se enfrenta a grandes desafíos, por un lado, el crecimiento de la población demanda una mayor producción de alimentos para satisfacer sus necesidades básicas (Seppelt *et al.* 2022). Por otro lado, la producción de cultivos cada vez se ve afectada por una serie de factores abióticos como las altas o bajas temperaturas, salinidad o sequías (Pessarakli y Szabolcs 2019); y bióticos como plagas, enfermedades y malezas (Atkinson y Urwin 2012). Estos factores en conjunto limitan el crecimiento y desarrollo de las plantas, merman su capacidad productiva y demeritan la calidad de los frutos. Ante estas problemáticas se han buscado productos que puedan mitigar los efectos negativos del estrés, que mejoren la actividad fisiológica de las plantas y su crecimiento (Du-Jardin 2015).

Los bioestimulantes agrícolas, son sustancias o microorganismos que, ayudan a las plantas a aumentar su eficiencia fisiológica, en la absorción y asimilación de nutrientes, en la inducción de tolerancia a diferentes tipos de estrés biótico y abiótico, mejoran algunas características agronómicas, y promueven la expresión génica de algunas cualidades presentes en ciertas variedades e híbridos (Du-jardin 2015, González-González *et al.* 2020, Han *et al.* 2021). Al respecto, se sabe que las plantas y los hongos han evolucionado conjuntamente desde el origen de las plantas terrestres y con ellas el concepto de mutualismo o parasitismo es útil para describir el rango extendido de relaciones que se desarrollaron en los tiempos evolutivos (Hossain *et al.* 2017). Las bacterias de vida libre o asociativas que habitan la rizosfera estimulan el crecimiento de las plantas por medio de mecanismos, como: síntesis de sustancias reguladoras del crecimiento vegetal, fijación de nitrógeno, solubilización de nutrimentos, producción de sideróforos y control de fitopatógenos del suelo. Los microorganismos más estudiados pertenecen a los géneros *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Klebsiella*, *Beijerinckia*, *Pseudomonas* y *Bacillus*; algunos de los cuales sobreviven en condiciones de estrés (Yagmur y Gunes 2021).

Los productos derivados de extractos de al-

gas clasificados como bioestimulantes, ayudan a la absorción de nutrientes, activan mecanismos de defensa y contienen sustancias activas que promueven el crecimiento de las plantas (Ali *et al.* 2021). Los extractos de *Ascophyllum nodosum* contribuyen en la formación de agentes gelificantes, retención de agua y aeración de suelo, mejoran la fijación e intercambio catiónico y estimulan la proliferación de microflora en el suelo (Kaur 2020, Mahusook *et al.* 2021). Además, las fitohormonas que contienen favorecen la disminución y regulación positiva de los genes biosintéticos que actúan en los tejidos de la planta (Wally *et al.* 2013), a la vez que sus compuestos actúan como reguladores antiestrés de las plantas (Banakar *et al.* 2022).

Recientemente la producción agrícola ha experimentado la incorporación de nanopartículas (NP). Debido a sus diferentes propiedades físicas y químicas, con la interacción de organismos vivos como son las plantas y microorganismos, expuestos a los nanomateriales, tanto las plantas como los microorganismos han mostrado su capacidad de tolerar diferentes concentraciones y tipos de NP, a la vez que mejoran sus procesos fisiológicos y la calidad de frutos, por lo que pueden ser considerados como estimulantes minerales (Liu y Lal 2015, Venkatachalam *et al.* 2017). Las NP'SZnO son precursoras de auxinas que promueve la división y elongación celular e influyen en la reactividad del ácido indolacético, el cual funciona como fitoestimulante hormonal, estas nanopartículas están asociadas en la biosíntesis de citoquininas y giberelinas; así como a la inducción de mayor actividad de enzimas antioxidantes y mejoras en el crecimiento de la planta (Méndez-Argüello *et al.* 2016).

El tomate es una hortaliza importante a nivel agronómico, su cultivo ocupa la mayor superficie sembrada en el mundo (SIAP-SADER 2020). De este cultivo, China es el primer productor y consumidor a nivel mundial, mientras que Estados Unidos es el principal importador y México el principal exportador (SIAP-SADER 2020). Debido a la importancia económica que este cultivo genera y la necesidad de obtener información sobre alternativas que permitan incrementar la productividad en los cultivos con

mínimo impacto al ambiente, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de la aplicación foliar de extracto de alga y nanopartículas de óxido de zinc, y la coinoculación del sustrato con microorganismos rizosféricos sobre la acumulación de biomasa en plantas de tomate.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Establecimiento del experimento

La investigación se desarrolló en un invernadero tipo túnel con cubierta de policarbonato con extractor de aire para controlar la temperatura, en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila México, cuyas coordenadas geográficas son: latitud Norte 25° 27', longitud Oeste 101° 02' y a una altura de 1 610 msnm. Se utilizaron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L) tipo saladett, variedad El Cid F1 (Harris moran). La producción de las plántulas se realizó en charolas de poriestireno de 200 cavidades y 32 días después de la siembra se realizó el trasplante a bolsas de polietileno de 12 L utilizando como sustrato una mezcla de turba y perlita a una proporción de 50:50% (v/v). La nutrición de las plántulas y del cultivo se hizo por medio de la aplicación de la solución nutritiva Steiner (Steiner 1961) utilizando un sistema de riego localizado. Las plantas se manejaron a un solo tallo con tutorado tipo holandés. La densidad de siembra fue de 6 plantas por m<sup>2</sup>, que se mantuvieron 110 días desde el trasplante.

### Aplicación de tratamientos

Se evaluaron tres dosis de nanopartículas de ZnO (NP'SZnO = 0, 50 y 250 mg L<sup>-1</sup>) (CIQA), tres dosis de extractos de algas (*A. nodosum*) (EA = 0, 500, 2 500 ppm), y dos condiciones de manejo del sustrato (sin microorganismos [SMos] y con microorganismos rizosféricos en el sustrato [CMos = 10 esporas mL<sup>-1</sup> de *Glomus intraradices* y 1x10<sup>6</sup> UFC de *Azospirillum brasilense*]). Las dosis de NP'SZnO y EA fueron aplicadas vía foliar con un atomizador procurando una cobertura homogénea del follaje en todas las plantas; en tanto que, el tratamiento CMos se aplicó vía Drench, aplicando al sustrato 20 mL de

una solución con la concentración establecida y estandarizada por planta. Las aplicaciones se iniciaron 15 días después del trasplante y después con intervalo de 15 días para un total de cinco aplicaciones. Las NP'SZnO que se utilizaron fueron de morfología semiesférica, con tamaño promedio de partícula de 23.44 nm, sintetizadas por medio del método de precipitación química (Hsieh 2007) en el Centro de Investigación de Química Aplicada (CIQA) en Saltillo, Coahuila, México.

### Variables vegetativas

Se evaluó el peso fresco de hoja (PFH), peso fresco de tallo (PFT) y peso fresco de raíz (PFR). Para determinar el PFR, las raíces de las plantas se lavaron con agua potable y agua destilada para eliminar el exceso de sustrato. Posteriormente, los órganos vegetales se introdujeron en un horno de secado a 70 °C durante 36 h para posteriormente registrar el peso seco de hoja (PSH), peso seco de tallo (PST) y peso seco de raíz (PSR). La biomasa total de raíz (BR), hoja (BH) y tallo (BT) se obtuvo por medio de la fórmula  $B\% = PS * 100 / PF$ , en la cual se considera el peso fresco y el peso seco para el órgano específico de la planta que corresponde.

### Análisis Estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial (3x3x2) con un total de 18 tratamientos, con ocho repeticiones. Los resultados fueron procesados mediante un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ) con el software Infostat 2020v para Windows 10.

## RESULTADOS

Las dosis evaluadas de EA afectaron estadísticamente a las variables de PFH, PFT, PFR, PSH, PST, BH, BT y BR, pero solo las variables PST, BT y BR fueron mejoradas por las dosis de 500 y 2 500 ppm de EA, superando el valor obtenido por las plantas a las que no se les aplicó EA (Tabla 1). El factor NP'SZnO afectó significativamente las variables de PFR, PSH, PSR, BH, BT y BR; en este factor las dosis

**Tabla 1.** Efecto de la aplicación de bioestimulantes en diferentes parámetros de acumulación de biomasa en la planta de tomate.

Fact	Dosis	PFH (g)	PFT (g)	PFR (g)	PSH (g)	PST (g)	PSR (g)	BH (%)	BT (%)	BR (%)
EA	0	418.21 <sup>ab</sup>	239.54 <sup>a</sup>	102.13 <sup>a</sup>	49.77 <sup>a</sup>	28.04 <sup>b</sup>	8.45 <sup>a</sup>	11.86 <sup>a</sup>	11.77 <sup>b</sup>	8.87 <sup>b</sup>
	500	410.75 <sup>b</sup>	224.23 <sup>b</sup>	86.92 <sup>b</sup>	46.21 <sup>b</sup>	28.79 <sup>ab</sup>	8.22 <sup>a</sup>	11.25 <sup>b</sup>	12.85 <sup>a</sup>	9.48 <sup>a</sup>
	2500	436.56 <sup>a</sup>	230.69 <sup>ab</sup>	90.42 <sup>b</sup>	46.54 <sup>b</sup>	30.6 <sup>a</sup>	8.4 <sup>a</sup>	10.7 <sup>c</sup>	13.26 <sup>a</sup>	9.4 <sup>a</sup>
ANOVA		p ≤ 0.0048	p ≤ 0.0264	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0035	p ≤ 0.0094	p ≤ 0.7356	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0026
NP'SZnO	0	422.04 <sup>a</sup>	230.21 <sup>a</sup>	84.00 <sup>b</sup>	46.42 <sup>b</sup>	30.04 <sup>a</sup>	7.04 <sup>c</sup>	11.07 <sup>b</sup>	13.04 <sup>a</sup>	8.61 <sup>b</sup>
	50	421.1 <sup>a</sup>	230.6 <sup>a</sup>	94.15 <sup>a</sup>	46.56 <sup>b</sup>	28.33 <sup>a</sup>	9.68 <sup>a</sup>	11.07 <sup>b</sup>	12.29 <sup>b</sup>	10.34 <sup>a</sup>
	250	422.38 <sup>a</sup>	233.65 <sup>a</sup>	101.31 <sup>a</sup>	49.54 <sup>a</sup>	29.06 <sup>a</sup>	8.36 <sup>b</sup>	11.67 <sup>a</sup>	12.55 <sup>b</sup>	8.79 <sup>b</sup>
ANOVA		p ≤ 0.9864	p ≤ 0.7994	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0103	p ≤ 0.1324	p ≤ <0.0001	p ≤ 0.0032	p ≤ 0.0009	p ≤ 0.0001
Mos	0	412.83 <sup>b</sup>	229.54 <sup>a</sup>	96.29 <sup>a</sup>	48.07 <sup>a</sup>	29.18 <sup>a</sup>	7.63 <sup>b</sup>	11.6 <sup>a</sup>	12.7 <sup>a</sup>	8.36 <sup>b</sup>
	10Esp-1+10x6UFC	430.85 <sup>a</sup>	233.43 <sup>a</sup>	90.01 <sup>b</sup>	46.94 <sup>a</sup>	29.11 <sup>a</sup>	9.09 <sup>a</sup>	10.94 <sup>b</sup>	12.56 <sup>a</sup>	10.14 <sup>a</sup>
	ANOVA		p ≤ 0.0064	p ≤ 0.3982	p ≤ 0.0283	p ≤ 0.2306	p ≤ 0.9200	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.3688
Interacción	EA*NP'SZnO	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.2265	p ≤ 0.0018	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.3669	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0002	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0001
	EA*Mos	p ≤ 0.8417	p ≤ 0.0532	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.1227	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.5177	p ≤ 0.132	p ≤ 0.0007	p ≤ 0.0001
	NP'SZnO*Mos	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0026	p ≤ <0.0001	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.2407	p ≤ 0.0046	p ≤ 0.1869	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0001
	EA*NP'SZnO*Mos	p ≤ 0.2708	p ≤ 0.0029	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0026	p ≤ 0.0008	p ≤ <0.0001	p ≤ 0.0046	p ≤ 0.0001	p ≤ 0.0001
CV (%)		9.24	11.89	18.21	11.79	14.21	17.21	8.61	7.66	9.85

Fact = factor, CV = coeficiente de variación, PFH = peso fresco hoja, PSH = peso seco hoja, PFT = peso fresco tallo, PST = peso seco tallo, PFR = peso fresco raíz, PSR = peso seco raíz, BH = biomasa total de hoja, BT = biomasa total de tallo, BR = biomasa total de raíz. Mos = microorganismos, EA = extractos de alga, NP'SZnO = nanopartículas de óxido de zinc. p ≤ = valor de la probabilidad del estadístico de F. Letra diferente en la misma columna son significativamente diferente con base en la prueba de Tukey (p ≤ 0.05).

de 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> mostraron el mayor PFR (94.15 y 101.31 g planta<sup>-1</sup>, respectivamente); en tanto que, la dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> presentó el mayor PSR (9.68 g planta<sup>-1</sup>) y BR (10.34%); mientras que, la dosis de 250 mg L<sup>-1</sup> mostró los mejores efectos para el PSH (49.54 g planta<sup>-1</sup>) y BH (11.64%). El factor microorganismos de manera independiente afectó estadísticamente las variables de PFH, PFR, PSR, BH y BR, pero se observó que las variables de PFH (430.85 g planta<sup>-1</sup>), PSR (9.09 g planta<sup>-1</sup>) y BR (10.14%) incrementaron al coinocular el sustrato con los microorganismos. Las interacciones mostraron diferencias estadísticas significativas en las variables vegetativas evaluadas.

El PFH presentó efecto positivo con la aplicación de NP'SZnO a dosis de 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> en las dos condiciones de manejo, para SMos en el sustrato incrementó de 6.2 y 24.8%, respectivamente, mientras que CMos el incremento fue de 22.4 y 11.5%, respectivamente, comparado con el T0 (Tabla 2). La aplicación de EA a dosis de 500 y 2 500 ppm promovió el incremento de PFH (4.9 y 16.79%, respectivamente) en condición SMos, en tanto que con CMos el incremento fue de 17.1 y 32.2%, respectivamente, sobre el T0. Las interacciones entre NP'SZnO con EA en ambas condiciones SMos y CMos no mejoraron el PFH. El suministro de microorganismos en el sustrato (TP) incrementó 8.0% en el PFH con respecto a T0.

El PFT en plantas tratadas con NP'SZnO a dosis de 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> SMos en el sustrato redujo 9.86 y 7.38%, respectivamente, comparado con T0, mientras que el impacto de la pérdida fue menor con CMos en el sustrato (6.04 y 0.05%, respectivamente). A su vez, las plantas tratadas con EA a dosis de 500 y 2 500 ppm manifestaron pérdidas contrastantes en el PFT, la condición de manejo SMos registró pérdidas de 20.87 y 1.30%, respectivamente. Mientras que en condición CMos la pérdida fue de 8.45 y 14.35%, respectivamente; con respecto a T0. Los tratamientos EA a 500 ppm + NP'SZnO a 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> incrementaron la pérdida de PFT (17.44 y 12.51%, respectivamente), resultado similar mostró la combinación de EA a 2 500 ppm + NP'SZnO a 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> al reducir el peso en 15.75 y 16.47%, respectivamente. El TP presentó la mayor pérdida de PFT con 21.21% sugiriendo antagonismo entre los microorganismos y la planta (Tabla 2).

En cuanto al PFR, con excepción del tratamiento NP'SZnO a dosis de 250 mg L<sup>-1</sup>, los resultados se manifestaron en forma negativa. Las plantas asperjadas con NP'SZnO a dosis de 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> SMos presentaron efectos contrastantes, por un lado, la aspersión de NP'SZnO a dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> presentó pérdida del 35.53% con respecto al T0, por otro lado, la dosis de 250 mg L<sup>-1</sup> de NP'SZnO promovió el desarrollo radicular y alcanzó un incremento de 23.75% sobre T0. Las plantas tratadas con

**Tabla 2.** Comportamiento de la interacción de bioestimulantes a diferentes parámetros de acumulación de biomasa en la planta de tomate.

Mos	EA	Int NP'SZnO	PFH (g)	PSH (g)	PFT (g)	PST (g)	PFR (g)	PSR (g)	BH (%)	BT (%)	BR (%)
SMos	0	0	372.88 <sup>d</sup>	42.63 <sup>b</sup>	258.75 <sup>a</sup>	32.5 <sup>ab</sup>	117.88 <sup>ab</sup>	7.25 <sup>ef</sup>	11.47 <sup>b</sup>	12.54 <sup>b-f</sup>	6.32 <sup>ef</sup>
		50	396 <sup>bcd</sup>	44 <sup>b</sup>	233.25 <sup>ab</sup>	26.5 <sup>abc</sup>	76 <sup>efg</sup>	8.75 <sup>b-f</sup>	11.11 <sup>bc</sup>	11.35 <sup>e</sup>	11.51 <sup>ab</sup>
		250	465.5 <sup>ab</sup>	65.38 <sup>a</sup>	239.63 <sup>ab</sup>	30.75 <sup>ab</sup>	145.88 <sup>a</sup>	7.5 <sup>def</sup>	14.06 <sup>a</sup>	12.76 <sup>a-e</sup>	5.43 <sup>f</sup>
	500	0	391.25 <sup>cd</sup>	43.5 <sup>b</sup>	204.75 <sup>b</sup>	25.75 <sup>bc</sup>	82.88 <sup>f</sup>	4.38 <sup>g</sup>	11.16 <sup>bc</sup>	12.59 <sup>b-e</sup>	5.26 <sup>f</sup>
		50	398.63 <sup>bcd</sup>	46.88 <sup>b</sup>	213.63 <sup>ab</sup>	27.63 <sup>abc</sup>	78.75 <sup>c-g</sup>	7.63 <sup>def</sup>	11.78 <sup>b</sup>	12.9 <sup>a-e</sup>	9.67 <sup>cd</sup>
		250	408.13 <sup>bcd</sup>	46 <sup>b</sup>	226.38 <sup>ab</sup>	27.38 <sup>abc</sup>	79.75 <sup>c-g</sup>	9.88 <sup>a-d</sup>	11.18 <sup>bc</sup>	12.1 <sup>de</sup>	12.36 <sup>a</sup>
	2500	0	435.5 <sup>a-d</sup>	50 <sup>b</sup>	255.38 <sup>a</sup>	33.38 <sup>a</sup>	71.25 <sup>f</sup>	6.38 <sup>fg</sup>	11.47 <sup>b</sup>	13 <sup>a-e</sup>	8.9 <sup>d</sup>
		50	411 <sup>bcd</sup>	44.75 <sup>b</sup>	218 <sup>ab</sup>	28.5 <sup>abc</sup>	108.63 <sup>bc</sup>	9.63 <sup>b-e</sup>	10.84 <sup>bc</sup>	13.04 <sup>a-d</sup>	8.85 <sup>d</sup>
		250	436.63 <sup>a-d</sup>	46 <sup>b</sup>	216.13 <sup>ab</sup>	30.25 <sup>ab</sup>	105.63 <sup>b-e</sup>	7.25 <sup>ef</sup>	11.35 <sup>bc</sup>	14.03 <sup>ab</sup>	6.89 <sup>e</sup>
CMos	0	0	402.88 <sup>bcd</sup>	46.13 <sup>b</sup>	203.88 <sup>b</sup>	26.88 <sup>abc</sup>	60.63 <sup>g</sup>	6.5 <sup>fg</sup>	11.43 <sup>b</sup>	13.19 <sup>a-d</sup>	10.58 <sup>bc</sup>
		50	456.38 <sup>abc</sup>	51.25 <sup>b</sup>	243.13 <sup>ab</sup>	28.5 <sup>abc</sup>	116.25 <sup>ab</sup>	12.25 <sup>a</sup>	11.26 <sup>bc</sup>	11.68 <sup>bc</sup>	10.58 <sup>bc</sup>
		250	415.63 <sup>bcd</sup>	49.25 <sup>b</sup>	258.63 <sup>a</sup>	23.13 <sup>c</sup>	96.13 <sup>b-f</sup>	8.46 <sup>b-f</sup>	11.81 <sup>b</sup>	9.09 <sup>f</sup>	8.8 <sup>d</sup>
	500	0	436.75 <sup>a-d</sup>	48.88 <sup>b</sup>	236.88 <sup>ab</sup>	32 <sup>ab</sup>	77.75 <sup>d-g</sup>	7.5 <sup>def</sup>	11.19 <sup>bc</sup>	13.49 <sup>abc</sup>	9.61 <sup>cd</sup>
		50	426.63 <sup>a-d</sup>	48.5 <sup>b</sup>	234.5 <sup>ab</sup>	27.25 <sup>abc</sup>	95.63 <sup>b-f</sup>	10.25 <sup>abc</sup>	11.37 <sup>bc</sup>	11.73 <sup>de</sup>	11.31 <sup>ab</sup>
		250	403.13 <sup>bcd</sup>	43.5 <sup>b</sup>	229.25 <sup>ab</sup>	32.75 <sup>ab</sup>	106.75 <sup>bcd</sup>	9.22 <sup>b-e</sup>	10.83 <sup>bc</sup>	14.31 <sup>a</sup>	8.66 <sup>d</sup>
	2500	0	493 <sup>a</sup>	47.38 <sup>b</sup>	221.63 <sup>ab</sup>	29.75 <sup>abc</sup>	93.63 <sup>b-f</sup>	10.26 <sup>abc</sup>	9.68 <sup>c</sup>	13.45 <sup>abc</sup>	10.97 <sup>abc</sup>
		50	438 <sup>a-d</sup>	44 <sup>b</sup>	241.13 <sup>ab</sup>	31.63 <sup>ab</sup>	89.63 <sup>b-g</sup>	9.05 <sup>b-e</sup>	10.08 <sup>bc</sup>	13.06 <sup>a-d</sup>	10.14 <sup>bcd</sup>
		250	405.25 <sup>bcd</sup>	43.63 <sup>b</sup>	231.88 <sup>ab</sup>	30.13 <sup>abc</sup>	73.75 <sup>f</sup>	7.83 <sup>def</sup>	10.77 <sup>bc</sup>	13 <sup>a-e</sup>	10.62 <sup>bc</sup>
CV (%)			9.24	11.89	18.21	11.79	14.21	17.21	8.61	7.66	9.85

Int = interacción, CV = coeficiente de variación, PFH = peso fresco hoja, PSH = peso seco hoja, PFT = peso fresco tallo, PST = peso seco tallo, PFR = peso fresco raíz, PSR = peso seco raíz, BH = biomasa total de hoja, BT = biomasa total de tallo, BR = biomasa total de raíz, SMos = sin microorganismos, CMos = con microorganismo, EA = extractos de alga NP'SZnO = nanopartículas de óxido de zinc. Letra diferente en la misma columna es significativamente diferente con base en la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

EA a dosis de 500 y 2 500 ppm presentaron pérdida del 29.69 y 39.56%, respectivamente; comparado con T0. La combinación de EA a dosis de 2 500 ppm con NP'SZnO a dosis de 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> manifestaron pérdidas menores que cuando se combinaron con EA a dosis de 500 ppm. Los resultados no mejoraron con la TP en el sustrato ya que éstos de manera particular provocaron la pérdida de PFR de 48.57%. Las NP'SZnO solas o combinadas con EA a 500 ppm redujeron el impacto de la pérdida de PFR en condición CMos en el sustrato (Tabla 2).

El PSH fue favorecido por la aplicación de los tratamientos, ya que todos superaron al testigo absoluto. El mejor efecto se observó con la aspersión de NP'SZnO a dosis de 250 mg L<sup>-1</sup>, este promovió un incremento del 53% del peso seco. La aplicación de EA a dosis de 2 500 ppm incrementó el 17.29%; en tanto que el resto de los tratamientos SMos presentaron incrementos en un rango de 2.04 a 9.97% sobre el valor de T0. Con la TP en el sustrato mejoró la respuesta de los tratamientos NP'SZnO a 50 mg L<sup>-1</sup>, EA a 500 ppm y la combinación NP'SZnO a 50 mg L<sup>-1</sup> + EA a 500 ppm con incremento del 20.22, 14.66 y 13.77%, respectivamente. La presencia de

microorganismos en el sustrato tuvo efecto positivo en el PSH en los tratamientos NP'SZnO a 250 mg L<sup>-1</sup> y EA a 2 500 ppm (15.53 y 11.14%, respectivamente), sin embargo, estos no alcanzaron los incrementos mostrados con las aplicaciones SMos indicados previamente (Tabla 2).

El PST se vio afectado en forma negativa por la aplicación de los bioestimulantes a base de NP'SZnO y EA en las dos condiciones de sustrato (CMos y SMos) manejadas; con excepción de los tratamientos EA a dosis de 2 500 ppm (SMos) y NP'SZnO a 250 mg L<sup>-1</sup> + EA a 500 ppm que tuvieron incremento de 2.71 y 0.77%, el resto de los tratamientos mostraron pérdida de peso (Tabla 2).

La aplicación de NP'SZnO a dosis de 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> incrementó el PSR en 20.69 y 3.45%, respectivamente, en condición SMos. Pero este peso seco tuvo incremento mayor en condición CMos (68.97 y 16.69%, respectivamente). La aplicación de los EA a 500 y 2 500 ppm afectaron el PSR dependiendo de la condición, mientras que SMos mostraron pérdida de 39.59 y 12.00%, respectivamente. En tanto que, en condición CMos tuvo incrementos de 3.43 y 41.52%, respectivamente, comparado con T0. La

combinación de NP'SZnO a dosis de 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> con EA a dosis de 500 y 2 500 ppm fueron más eficientes en la condición CMos y mostraron mayores incrementos (Tabla 2). El tratamiento TP tuvo efecto negativo al presentar pérdida de 10.34% de peso seco de raíz comparado con el T0.

La BH fue afectada por la aplicación de los tratamientos con bioestimulantes. La dosis de NP'SZnO de 250 mg L<sup>-1</sup> promovió efectos positivos con incrementos del 22.58 y 2.96% para las condiciones SMos y CMos, respectivamente. El resto de los tratamientos e interacciones correspondientes presentaron reducción de la BH comparado con T0 (Tabla 2).

La aplicación de NP'SZnO a dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> afectó de forma negativa la BT al presentar una pérdida de 9.49 y 6.89%, para CMos y SMos, respectivamente. Por otro lado, el tratamiento de NP'SZnO a dosis de 250 mg L<sup>-1</sup> promovió un incremento de 1.75% en la BT en condición de SMos, pero en condición de CMos se manifestó antagonismo al presentar disminución de 27.51%. La BT incrementó con la aplicación de EA a dosis de 500 y 2 500 ppm condición de SMos (0.40 y 3.67%, respectivamente) y en condición de CMos (7.58 y 7.26%, respectivamente). Las interacciones con mejor efecto sobre el contenido de BT fueron NP'SZnO 250 + EA 2 500 con incremento del 11.88% (SMos) y NP'SZnO 250 + EA 500 con incremento del 14.11% (CMos), en todos los casos comparado con T0 (Tabla 2).

La aplicación de NP'SZnO a dosis de 50 mg L<sup>-1</sup> promovió incremento del 82.12 y 67.41%, respectivamente, para SMos y CMos. Los efectos de la dosis 250 mg L<sup>-1</sup> de NP'SZnO fueron dependientes de la condición de manejo, ya que se presentó pérdida del 14.08% en la BR en condición de SMos, en tanto que, CMos manifestó simbiosis y promovió un incremento del 39.24% de la BR. La aplicación de EA a dosis de 500 y 2 500 ppm tuvieron mejores efectos en la condición de CMos, en esa condición de manejo el tratamiento EA a 500 y 2 500 ppm promovieron incrementos del 52.06 y 73.58%, respectivamente. La BR se vio favorecida con la combinación entre NP'SZnO a 250 mg L<sup>-1</sup> + 500 ppm de EA en ausencia de microorganismos, en

tanto que la interacción entre NP'SZnO a 50 mg L<sup>-1</sup> + EA a 500 ppm en CMos incrementó 78.96% la BR, en todos los casos comparado con T0.

## DISCUSIÓN

Los nanofertilizantes, como las NP'SZnO, debido a su naturaleza permiten una liberación lenta y absorción eficiente de nutrientes por parte de los cultivos, logrando un mejor desarrollo de las plantas (Elemike *et al.* 2019). Así mismo, los extractos de algas marinas contienen macro y microelementos, vitaminas, aminoácidos, hormonas naturales de crecimiento vegetal y azúcares (Ozbay y Demirkiran 2019, Shukla *et al.* 2019), con lo cual mejoran el crecimiento de los cultivos. En tanto que, los microorganismos estimulan el crecimiento de las plantas mediante la síntesis de sustancias reguladoras del crecimiento vegetal, fijación de nitrógeno, solubilización de nutrientes y producción de sideróforos (Yagmur y Gunes 2021). El efecto positivo del EA, NP'SZnO y microorganismos, por separado o en interacción, sobre el peso fresco, peso seco y biomasa de las plantas de tomate se observó en este trabajo. En diferentes trabajos se ha reportado el efecto bioestimulante de los microorganismos en plantas tal es el caso de los resultados reportados por Hernández *et al.* (2018), quienes señalaron que la aplicación de *Azospirillum halopraeferens* promovió la ganancia en el peso fresco de la planta de chile (*Capsicum annum*), obteniendo 58.66% más peso fresco que el control. Así mismo, Ahmed (2021) indicaron que con la aplicación de *A. brasilense* en plantas de pimiento morrón se logró un incremento del 130.2% el peso fresco de la planta en comparación al testigo no inoculado. Por su parte, Kahromi y Najafi (2020) reportaron que al aplicar *G. intaradices* en el cultivo de alfalfa se observó aumento del peso fresco de hoja, tallo y raíz. También se han presentado reportes de la mejora de la producción de biomasa de las plantas al aplicar extractos de algas de manera foliar, tal como lo reporta Ozbay y Demirkiran (2019), quienes señalaron que al aplicar extractos de algas de manera foliar en una concentración de 1 mL L<sup>-1</sup> incrementó 83.3% el peso fresco de las plántulas de

pimiento. En espinaca, la aplicación de  $0.1 \text{ g L}^{-1}$  de *A. nodosum* causó aumento del 58% del peso fresco de hojas (Fan et al. 2013). Por su parte, la aplicación de NP'SZnO a  $50 \text{ mgL}^{-1}$  aumentó un 40% en el peso fresco de las plantas tratadas (Faizan y Hayat 2019). En plantas ornamentales de Lupina la aplicación de  $60 \text{ mg L}^{-1}$  de NP'SZnO promovió incremento del 33% del peso fresco comparado con el testigo (Abdel Latef et al. 2018).

Con referencia al peso seco de la planta, la aplicación de rizobacterias en los cultivos hortofrutícolas ha mostrado efectos positivos, estos se reflejan en la mayor producción de fibra (Delgado-Ramírez et al. 2021). La aplicación de microorganismos en coinoculación entre *A. brasilense* con *Glomus intradices* mejora el peso seco de hoja, tallo y raíz de Yacón, además de incrementar la calidad bromatológica y el porcentaje de cantidad de fibra acumulada en el cultivo (Di-Barbaro et al. 2021). Esta misma combinación, en rábanos incrementó el peso seco de hojas y de raíz (Rodríguez-Larramendi et al. 2020). Por otro lado, la aplicación de microorganismos arbusculares al sustrato en combinación con extractos de algas asperjados a las plantas de tomate mejoró el peso seco de la planta hasta en 45.5%, lo que manifestó sinergia positiva entre los microorganismos y la planta (González-González et al. 2020). En el mismo contexto, la aplicación de extractos de algas promueve la acumulación de peso seco de las plantas. Tal es el caso de plantas de tomate asperjadas con  $50 \text{ mg L}^{-1}$  obtuvieron 226.11% mayor peso sobre el control (Goñi et al. 2018). La aspersión de *Ascophyllum nodosum* en plantas de pepino a concentración de 0.5% provocó un incremento en el peso seco de la planta en 113% (Abkhoo y Sabbagh 2016). Por otro lado, la aplicación de NP'SZnO a concentración de  $1.5 \text{ mg L}^{-1}$  incrementó el peso seco de la planta de garbanzo (Mahajan et al. 2011). Mientras que la aplicación de 2 ppm en plantas de maíz aumentó el desarrollo y el peso seco de las plantas (Ittroutwar et al. 2020), a su vez en el cultivo de café la aplicación de NP'SZnO promovió el incremento de peso seco de 25, 65 y 45% en hoja, tallo y raíz, respectivamente (Rossi et al. 2019). La aspersión foliar de NP'SZnO a concentración de  $5 \text{ g L}^{-1}$  en el cultivo de arroz incrementó en

un 61.01% el peso seco de la planta comparado con control (Bala et al. 2019). En trigo, la aplicación de NP'SZnO a 100 ppm incrementó en un 15% el peso seco de la planta (Hussain et al. 2018). Al respecto, Pérez-Velasco et al. (2021) reportan que al aplicar las NP'SZnO a concentración de 1 500 ppm aumentó de manera significativa el peso seco, que fue un 17.31% mayor que el testigo.

Los hongos micorrízicos arbusculares colonizan las raíces de la mayoría de las especies de plantas terrestres, mejorando el crecimiento, la absorción de nutrientes, la resistencia y tolerancia al estrés biótico/abiótico; de manera similar, las bacterias promotoras del crecimiento vegetal mejoran la aptitud y la producción de las plantas (Todeschini et al. 2018). Estudios recientes han reportado que la aplicación de microorganismos rizosféricos mejora la producción de biomasa, al respecto Di-Barbaro et al. (2021) observaron un incremento en la producción de fibra en Yacón. Mientras que, Rodríguez-Larramendi et al. (2020) al aplicar microorganismos (*G. intradices*) y bacterias nitrificantes (*A. brasilense*) en el cultivo de rábano indujo incremento de la biomasa aérea. En el presente estudio, las variables de biomasa se vieron beneficiadas por la presencia de los microorganismos rizosféricos al promover un incremento del peso fresco, lo que concuerda con lo reportado por Mashayekhi et al. (2021), quienes con la aplicación de rizobacterias en el cultivo de tomate obtuvieron un incremento del 9.8% de la biomasa lo que manifiesta buena relación simbiótica entre planta y microorganismos. Por su lado, la aplicación de extractos de algas de la especie *A. nodosum* tiene efecto positivo en la acumulación de biomasa, específicamente en el cultivo de soya se asperjo a concentración de  $1 \text{ g L}^{-1}$  alcanzando un incremento en el porcentaje de biomasa del 12% sobre el valor del control (Joshi-Paneri et al. 2020). Con la aplicación de  $4 \text{ ml L}^{-1}$  se tuvo un efecto positivo en la acumulación de biomasa de plantas de sandía en comparación con el control (De Mendonça et al. 2019). La aplicación foliar de extracto de *A. nodosum* a dosis de  $1 \text{ ml L}^{-1}$  en plantas de chile incrementó en un 15% la biomasa en comparación con el testigo (Ozbay y Demirkiran 2019). En este mismo contexto,

la aplicación de 5 g L<sup>-1</sup> de nanopartículas en el cultivo de arroz, reportan que la biomasa incrementó hasta un 55% (Bala *et al.* 2019) y a 50 ppm incrementó un 70% comparado con el testigo (Singh y Kumar 2018). El efecto de las nanopartículas sobre la biomasa está relacionado con la concentración y con el tamaño de la nanopartícula utilizadas, estas tienen la capacidad de dar una respuesta bioestimulante o del lado contrario un efecto tóxico en las plantas (Juárez-Maldonado *et al.* 2021).

### CONCLUSIONES

La aplicación individual de extracto de algas, NP'SZnO y microorganismos, como bioestimulantes de plantas, mejoraron el crecimiento vegetativo (peso fresco de hoja, peso fresco de raíz, peso seco de hoja, peso seco de tallo, peso seco de raíz, biomasa

total de hoja, biomasa total de tallo y biomasa total de raíz) de las plantas de tomate, principalmente cuando se aplicaron dosis de 500 y 2 500 ppm de extracto de algas y con 50 y 250 mg L<sup>-1</sup> de NP'SZnO. La interacción de microorganismos arbusculares, extracto de algas y NP'SZnO, tuvo efecto estimulante sobre el crecimiento vegetativo y manifestaron sinergia positiva.

### AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada para realizar estudios de postgrado. A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) por las todas facilidades otorgadas para el desarrollo de esta investigación.

### LITERATURA CITADA

- Abdel Latef AAH, Srivastava AK, El-sadek MSA, Kordrostami M, Tran LSP (2018) Titanium Dioxide nanoparticles improve growth and enhance tolerance of broad bean plants under saline soil conditions. *Land Degradation and Development* 29: 1065-1073.
- Abkhoo J, Sabbagh SK (2016) Control of *Phytophthora melonis* damping-off, induction of defense responses, and gene expression of cucumber treated with commercial extract from *Ascophyllum nodosum*. *Journal of Applied Phycology* 28: 1333-1342.
- Ahmed SM (2021) Influence of bio-fertilizers and addition methods on growth, yield, and quality of sweet pepper under green house. *Diyala Agricultural Sciences Journal* 13: 10-23.
- Ali O, Ramsubhag A, Jayaraman J (2021) Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production. *Plants* 10: 531. DOI: 10.3390/plants10030531.
- Atkinson NJ, Urwin PE (2012) The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. *Journal of Experimental Botany* 63: 3523-3543.
- Bala R, Kalia A, Dhaliwal SS (2019) Evaluation of efficacy of ZnO nanoparticles as remedial zinc nanofertilizer for rice. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 19: 379-389.
- Banakar SN, PrasannaKumar MK, Mahesh HB, Parivallal PB, Puneeth ME, Gautam C, Narayan, SS (2022) Red-seaweed biostimulants differentially alleviate the impact of fungicidal stress in rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific Reports* 12: 5993. DOI: 10.1038/s41598-022-10010-8.
- De Mendonça Júnior AF, Dos Santos Rodrigues APM, Júnior RS, Negreiros AMP, Bettini MO, Freitas CDM, Gomes TRR (2019) Seaweed extract *Ascophyllum nodosum* (L.) on the growth of watermelon plants. *Journal of Experimental Agriculture International* 31: 4. DOI: 10.9734/JEAI/2019/v31i430080.

- Delgado-Ramírez CS, Hernández-Martínez R, Sepúlveda E (2021) Rhizobacteria associated with a native solanaceae promote plant growth and decrease the effects of *Fusarium oxysporum* in tomato. *Agronomy* 11: 579. DOI: 10.3390/agronomy11030579.
- Di-Barbaro G, Andrada H, Del Valle E, Brandan de Weht C (2021) Evaluation of the effect of *Azospirillum brasilense* and Mycorrhizal fungi of the soil in Yacón grown in a greenhouse. *Open Journal of Agricultural Research* 1: 8-15.
- Du-Jardin P (2015) Plants biostimulants: Definition, concept, main categories, and regulation. *Scientia Horticulturae* 196: 3-14.
- Elemike EE, Uzoh IM, Onwudiwe D, Babalola OO (2019) The role of nanotechnology in the fortification of plant nutrients and improvement of crop production. *Applied Sciences* 9: 499. DOI: 10.3390/app9030499.
- Faizan M, Hayat S (2019) Effect of foliar spray of ZnO-NPs on the physiological parameters and antioxidant systems of *Lycopersicon esculentum*. *Polish Journal of Natural Sciences* 34: 87-105.
- Fan D, Hodges DM, Critchley AT (2013) Communications in soil science and plant analysis a commercial extract of brown macroalga (*Ascophyllum nodosum*) affects yield and the nutritional quality of spinach *in vitro*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44: 1873-1884.
- Goñi O, Quille P, O'connell S (2018) *Ascophyllum nodosum* extract biostimulants and their role in enhancing tolerance to drought stress in tomato plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 126: 63-73.
- González-González MF, Ocampo-Álvarez H, Santacruz-Ruvalcaba F, Sánchez-Hernández CV, Casarrubias-Castillo K, Becerril-Espinosa, Hernández-Herrera RM (2020) Physiological, ecological, and biochemical implications in tomato plants of two plant biostimulants: Arbuscular mycorrhizal fungi and seaweed extract. *Frontiers in Plant Science* 11: 999. DOI: 10.3389/fpls.2020.00999.
- Han X, Xi Y, Zhang Z, Mohammadi MA, Joshi J, Borza T, Wang-Pruski G (2021) Effects of phosphite as a plant biostimulant on metabolism and stress response for better plant performance in *Solanum tuberosum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 210: 111873. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111873.
- Hernández JLG, Alvarado MCR, Rangel PP, Nieto-Garibay A, Murillo-Amador B, Ruiz-Espinoza FH, Puente EOR (2018) Growth and oil yield parameters of the *Capsicum annuum* var *aviculare* associated to the beneficial bacterium *Bacillus amyloliquefaciens* and *Azospirillum halopraeferens* under field conditions. *Biotecnia* 20: 59-64.
- Hossain MM, Sultana F, Islam S (2017) Plant growth-promoting fungi (PGPF): phytostimulation and induced systemic resistance. In: Singh D, Singh H, Prabha R (eds) *Plant-microbe interactions in agro-ecological perspectives*. Springer. Singapore. pp: 135-191.
- Hsieh CH (2007) Spherical zinc oxide nano particles from zinc acetate in the precipitation method. *Journal of the Chinese Chemical Society* 54: 31-34.
- Hussain A, Ali S, Rizwan M, ur Rehman MZ, Javed MR, Imran M, Nazir R (2018) Zinc oxide nanoparticles alter the wheat physiological response and reduce the cadmium uptake by plants. *Environmental Pollution* 242: 1518-1526.
- Itrotwar PD, Kasivelu G, Raguraman V, Malaichamy K, Sevathapandian SK (2020) Effects of biogenic zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedling vigor of maize (*Zea mays*). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 29: 101778. DOI: 10.1016/j.bcab.2020.101778.
- Joshi-Paneri J, Chamberland G, Donnelly D (2020) Effects of *Chelidonium majus* and *Ascophyllum nodosum* extracts on growth and photosynthesis of soybean. *Acta Agrobotanica* 73: 1. DOI: 10.5586/aa.7313.

- Juárez-Maldonado A, Tortella G, Rubilar O, Fincheira P, Benavides-Mendoza A (2021) Biostimulation and toxicity: The magnitude of the impact of nanomaterials in microorganisms and plants. *Journal of Advanced Research* 31: 113-126.
- Kahromi S, Najafi F (2020) Growth and some physiological characteristics of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in response to lead stress and *Glomus intraradices* symbiosis. *Journal of Plant Process and Function* 9: 37.
- Kaur I (2020) Seaweeds: Soil Health Boosters for Sustainable Agriculture. In: Giri B, Varma A (eds) *Soil Health. Soil Biology*. Springer, Cham. UK. pp: 163-182.
- Liu R, Lal R (2015) Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Science of the Total Environment* 514: 131-139.
- Mahajan P, Dhoke SK, Khanna AS (2011) Effect of nano-ZnO particle suspension on growth of mung (*Vigna radiata*) and gram (*Cicer arietinum*) seedlings using plant agar method. *Journal of Nanotechnology* 2011. ID de artículo 696535. DOI: 10.1155/2011/696535.
- Mahusook SS, Rajathi F, Maharifa H, Sharmila R (2021) Comparative study of agarophytes-gracilaria edulis and gelidiella acerosa as biostimulant and application of agar for water-holding in soil and plant growth promotion. *Agricultural Science Digest-A Research Journal* 41: 21-27.
- Mashayekhi K, Dehkordi AG, Mousavizadeh, SJ, Rahnama K (2021) The effect of nitrogen and phosphorus supplier bacteria on the characteristics of tomato seedling. *Iranian Journal of Horticultural Science* 52: 113-123.
- Méndez-Argüello B, Vera-Reyes I, Mendoza-Mendoza E, García-Cerda LA, Puente-Urbina BA, Lira-Saldívar RH (2016) Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annuum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Nova Scientia* 8: 140-156.
- Ozbay N, Demirkiran AR (2019) Enhancement of growth in ornamental pepper (*Capsicum annuum* L.) plants with application of a commercial seaweed product, simplex<sup>®</sup>. *Applied Ecology and Environmental Research* 17: 4361-4375.
- Pérez-Velasco EA, Valdez-Aguilar LA, Betancourt-Galindo R, Martínez-Juárez J, Lozano-Morales SA, González-Fuentes JA (2021) Gas exchange parameters, fruit yield, quality, and nutrient status in tomato are stimulated by ZnO nanoparticles of modified surface and morphology and their application form. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21: 991-1003.
- Pessarakli M, Szabolcs I (2019) Soil salinity and sodicity as particular plant/crop stress factors. In: Pessarakli M (ed) *Handbook of plant and crop stress*. CRC Press. USA. pp: 1-16.
- Rodríguez-Larramendi LA, Guevara Hernández FLO, Arias MA, Reyes-Muro L, Campos-Saldaña RA, Salas-Marina MÁ (2020) Leaf growth and biomass accumulation in radish (*Raphanus sativus* L.) inoculated with rhizosphere microorganisms. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo* 52: 78-87.
- Rossi L, Fedenia LN, Sharifan H, Ma X, Lombardini L (2019) Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 135: 160-166.
- Seppelt R, Klotz S, Peiter E, Volk M (2022) Agriculture and food security under a changing climate: An underestimated challenge. *Iscience* 25(12): 105551. DOI: 10.1016/j.isci.2022.105551.

- Shukla PS, Mantin EG, Adil M, Bajpai S, Critchley AT, Prithviraj B (2019) *Ascophyllum nodosum*-based bio-stimulants: Sustainable applications in agriculture for the stimulation of plant growth, stress tolerance, and disease management. *Frontiers in Plant Science* 10: 655. DOI: 10.3389/fpls.2019.00655.
- SIAP-SADER (2020) Panorama agroalimentario 2020. Secretaría de agricultura y desarrollo rural, edición 2020, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México. pp: 84-85.
- Singh D, Kumar A (2018) Investigating long-term effect of nanoparticles on growth of *Raphanus sativus* plants: a trans-generational study. *Ecotoxicology* 27: 23-31.
- Steiner AA (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil* 15: 134-154.
- Todeschini V, Ait Lahmidi N, Mazzucco E, Marsano F, Gosetti F, Robotti E, Lingua G (2018) Impact of beneficial microorganisms on strawberry growth, fruit production, nutritional quality, and volatilome. *Frontiers in Plant Science* 9: 1611. DOI: 10.3389/fpls.2018.01611.
- Venkatachalam P, Jayaraj M, Manikandan R, Geetha N, Rene ER, Sharma NC, Sahi SV (2017) Zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) alleviate heavy metal-induced toxicity in *Leucaena leucocephala* seedlings: a physiochemical analysis. *Plant Physiology and Biochemistry* 110: 59-69.
- Wally AT, Critchley D, Hiltz JS, Craigie X, Han LI, Zaharia SR, Prithviraj B (2013) Erratum to: regulation of phytohormone biosynthesis and accumulation in arabidopsis following treatment with commercial extract from the marine macroalga *Ascophyllum nodosum*. *Journal of Plant Growth Regulation* 32: 340-341.
- Yagmur B, Gunes A (2021) Evaluation of the effects of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield and quality parameters of tomato plants in organic agriculture by principal component analysis (PCA). *Gesunde Pflanzen* 73: 219-228.