

Respuesta de la aplicación del yodo sobre antioxidantes, contenido mineral y crecimiento en frutos de tomate

Julia Medrano Macías^{1*}, Willian Narváez Ortiz¹, Deyanira Quistián Martínez², Adalberto Benavides Mendoza¹ y Paola Leíja Martínez¹

1-Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo, Coahuila, México.

2-Departamento de Botánica, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Ave. Pedro de Alba s/n. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, jmedmac@gmail.com

Resumen

El yodo no es un elemento catalogado como esencial en las especies vegetales, sin embargo, su aplicación exógena ha sido ampliamente estudiada con el propósito de biofortificación, lo cual representa una gran alternativa para mitigar el consumo humano deficiente de yodo. No obstante, existen poca información acerca de la influencia de este elemento sobre el metabolismo de las plantas, a pesar de su estatus como no esencial. Algunos hallazgos han mostrado efectos beneficiosos relacionados con una potenciación en el metabolismo antioxidante y la tolerancia al estrés. Por esa razón, esta investigación se llevó a cabo con el fin de evaluar el efecto del yodo sobre el crecimiento, contenido mineral y antioxidante, bajo condiciones de invernadero. Se probaron dos concentraciones de yodo (1 y 100 μM), dos especies químicas (KI y KIO_3), aplicadas vía foliar cada dos semanas. Según los resultados, la aplicación de KIO_3 a 1 y 100 μM mostró un incremento en la biomasa sin modificar el rendimiento del fruto en comparación con las plantas control. También se encontró que la aplicación de KIO_3 a 100 μM tuvo un efecto positivo en el contenido de N, P, K, Mg, Fe, Mn y Zn. Sin embargo, el mayor impacto en el incremento de antioxidantes se obtuvo con la aplicación de KI, donde se encontró un aumento del 80% de estos.

Palabras clave: antioxidantes, redox, yodo, biofortificación.

Abstract

Iodine is not an element cataloged as essential in vegetal species, the application of this in an exogenous way has been widely studied for the purpose of biofortification, which implies a great alternative to mitigate the deficient human consumption of iodine. However, few studies have been carried out to investigate the influence of iodine while it is absorbed and metabolized by the plant, despite its status as non-essential some findings have shown beneficial effects related to a potentiation in antioxidant metabolism and tolerance to stress, for that reason this research was carried out in order to evaluate the effect of iodine over growth, mineral and antioxidant content, under greenhouse conditions. Two concentrations of iodine was tested (1 and 100 μM), two chemical species (KI and KIO_3), applied via foliar biweekly. According to the results, the application of KIO_3 to 1 and 100 showed an increase in biomass without modifying the yield of the fruit in comparison with the control plants. It was also found that the application of KIO_3 to 100 had a positive effect with the content N, P, K, Mg, Fe, Mn and Zn. However, the greatest impact on the increase of antioxidants was obtained with the application of KI where 80% of these were found increased

Keywords- antioxidants, redox, iodine, biofortification.

I. INTRODUCCIÓN

El yodo no se considera un elemento esencial para las plantas, ya que no tiene una función primaria conocida en el metabolismo vegetal. Sin embargo, el yodo está relacionado con el aumento de la tolerancia al estrés oxidativo, asociado con su amplio poder redox. Incluso, se ha propuesto a este elemento como el primer antioxidante inorgánico en los sistemas biológicos [1]. En algunos estudios, se encontró que el yodo incrementaba la cantidad de antioxidantes, permitiendo una mayor resistencia a ciertos tipos de estrés abiótico, como la salinidad y los metales pesados [2]; por esta razón, se clasifica como un elemento benéfico [3], [4].

El uso de yodo en cultivos hortícolas ha mostrado resultados inconsistentes en términos de acumulación de biomasa y crecimiento [5]. Esto probablemente se deba a la intervención de numerosos factores, como la especie de planta, la concentración, la forma química y el momento de aplicación del yodo. Sin embargo, se ha observado que en cultivos sin suelo,

la aplicación en bajas concentraciones (1 μM) en especies de hojas causa un aumento en la biomasa [6]–[9]. También se ha observado que a concentraciones de 10 μM estas especies aumentan la acumulación de yodo sin dañar la planta [10]. Sin embargo, otros estudios han explicado que a concentraciones $>45 \mu\text{M}$, las plantas logran acumular este elemento en partes comestibles, así como un aumento en antioxidantes, pero con una reducción en la biomasa, posiblemente relacionada con la toxicidad del yodo [11], [12].

El tomate se considera una especie capaz de resistir grandes cantidades de yodo, acumulándolo en los frutos y sin afectar significativamente el crecimiento [13]–[15]. Tal característica hace que este cultivo sea adecuado para investigar los efectos del yodo sobre los antioxidantes y el contenido mineral. La aplicación agrícola de yodo para mejorar los sistemas antioxidantes, el contenido mineral, el crecimiento y el rendimiento no ha sido estudiada en detalle, y en los últimos años, la fertilización foliar se ha vuelto más importante, especialmente en la aplicación de micronutrientes, debido a una

administración más controlada, una absorción rápida y un impacto en el metabolismo de las plantas [16]. Aún más recientemente, se ha demostrado que la aplicación foliar de elementos beneficiosos como el yodo proporciona una forma eficiente y adecuada de biofortificación [17].

Por esta razón, el objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia de la aplicación de yodo vía foliar sobre el contenido de antioxidantes, minerales, crecimiento y rendimiento de plantas de tomate.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Material vegetal y condiciones de crecimiento

Las semillas de tomate var. Toro se sembraron en bandejas de poliestireno. Cincuenta días después de la siembra, las plántulas se trasplantaron a contenedores rígidos con 10 litros de una mezcla de turba y perlita 1:1. Los contenedores se colocaron en un invernadero tipo capilla de 10 x 20 m ubicado en Saltillo, México. La temperatura promedio fue de 20.7 °C, la radiación máxima de 741 W·m⁻² y la humedad relativa del 62.8 %. La nutrición se proporcionó con solución Steiner [18] a través de riego por goteo con conductividad eléctrica de 1.0 dS·m⁻¹ y pH de 6.5.

B. Aplicación de tratamientos y muestreo

La aplicación de los tratamientos comenzó quince días después del trasplante; se aplicaron dos especies químicas del yodo: KI y KIO₃ a 1 y 100 µM. Así como un control absoluto. Teniendo 10 unidades experimentales por tratamiento, dando un universo de 50 plantas. Los tratamientos se aplicaron con un rociador en cada foliolo para evitar escurrimientos.

El muestreo se realizó al azar a los 100 días después del trasplante. Para la cuantificación de antioxidantes y minerales, se recolectaron los frutos en estado de madurez con color #6 en la escala del USDA. Para la cuantificación de la biomasa, se muestrearon al azar cinco plantas completas (hojas, tallos, raíces).

C. Rendimiento del cultivo y crecimiento de la planta

El rendimiento del cultivo se cuantificó pesando todos los frutos cosechados de las cinco plantas muestreadas, en el primer corte de cosecha. Para la cuantificación de la biomasa, las plantas se dividieron en tallos, raíces y hojas y se colocaron en un horno de secado hasta obtener peso constante, a 60 °C (24 hrs). Finalmente, se pesaron utilizando una balanza digital OHAUS®. El peso seco se expresó en gramos por planta.

D. Determinación de minerales

Para cuantificar N, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn y Cu se realizó una digestión ácida de los frutos de tomate según lo establecido por la AOAC, 1990 [19]. Se colocó un gramo de muestra deshidratada en vasos de precipitados, se añadieron 30 mL de una mezcla 3:1 de ácido perclórico y nítrico durante 2 horas en una placa de calentamiento hasta la clarificación de la mezcla, y se llevó a un volumen de 100 mL con agua desionizada y se filtró con papel Whatman #11. Posteriormente, se cuantificó el contenido mineral con un espectrofotómetro de absorción atómica (AA) Varian Spectra 240 fs.

El nitrógeno (N) se analizó utilizando la técnica de micro Kjeldahl [20] y el fósforo se cuantificó indirectamente mediante reacción con ácido aminonaftolsulfónico (ANSA) y lectura en un espectrofotómetro UV-Vis. Todos los resultados se reportaron en unidades de g kg⁻¹.

E. Determinación de antioxidantes

Extracciones con solución buffer

Para analizar el potencial oxidorreductor (ORP), la capacidad antioxidante, la actividad enzimática y el glutatión, se realizaron extracciones con solución buffer. Las muestras (frutos de tomate enteros) se colocaron en un congelador a -20 °C durante 48 horas. Posteriormente, las muestras se liofilizaron y pulverizaron; para la extracción, se utilizaron 200 mg de muestras pulverizadas. El polvo se colocó en tubos de centrifuga, con un 10% de polivinilpirrolidona (PVP) para estabilizar las enzimas, después se añadieron 1.5 mL de buffer fosfato (pH 7.2). La solución se homogenizó mediante vortex durante 20 segundos y luego se sonificó durante 5 minutos. Cada muestra se centrifugó a 12,500 rpm a 4 °C durante 10 minutos. El sobrenadante se recogió, se filtró con una membrana de nailon [21] y se diluyó a una proporción de 1:15 con buffer de fosfatos.

Extracción con solución de acetona

Para el análisis de ascorbato y dehidroascorbato, se realizaron extracciones con una mezcla 1:1 de agua y acetona. Las muestras se liofilizaron y pulverizaron. 100 mg de muestra pulverizada se colocaron en tubos de centrifuga y se añadieron 1.5 mL de solución de agua:acetona [22]. La mezcla se vortexó durante 30 segundos, se sonificó durante 5 minutos y se centrifugó a 4 °C a 12,500 rpm durante 10 minutos; se recogió el sobrenadante y se filtró con una membrana de nailon.

Potencial oxidorreductor (ORP)

El ORP se midió con un potenciómetro Hanna HI 2211 en las extracciones realizadas con buffer fosfato inmediatamente después de ser obtenidas. Los resultados se reportaron en milivoltios (mV).

Potencial antioxidante (AP)

El análisis de AP se realizó utilizando la técnica de 1,1-difenil-2-picrilhidrazilo (DPPH), en la cual la forma oxidada de este radical absorbe a una longitud de onda máxima de 540 nm y en la que la inhibición de la oxidación se atribuye directamente a la presencia de antioxidantes. Los ensayos se leyeron con un lector de microplacas ELx800 con 96 pocillos. Se trazó una curva de calibración de Trolox y los resultados se expresaron en unidades de milimoles equivalentes de Trolox [23].

Superóxido dismutasa (SOD)

La actividad de la SOD se cuantificó a partir de extractos de biomoléculas mediante un lector de microplacas usando un kit de determinación Sigma 19160SOD. Este método se basa en cuantificar la conversión de sal de tetrazolio soluble en agua (WST) a tinte de formazán WST mediante espectrofotometría; la conversión ocurre por oxidación de iones superóxido formados por el conjunto de xantina (X)/xantina oxidasa (XO). La inhibición de la oxidación de WST se atribuye a la

neutralización de radicales superóxido causada por la SOD. Las unidades se expresaron como porcentaje de inhibición.

Actividad de la catalasa (Cat)

La actividad de la Cat se cuantificó mediante espectrofotometría. Para este ensayo, se mezclaron 100 µL de extracto de biomoléculas y 1 mL de H₂O₂ al 100 mM y se agitaron a 24 °C; posteriormente, se añadieron 400 µL de H₂SO₄ al 5% para detener la reacción. Los resultados de estos ensayos se analizaron utilizando un espectrofotómetro Thermo Scientific Genesis 10S UV-Vis a 270 nm y se registraron como tiempo de reacción cero (T0). Posteriormente, el extracto de biomoléculas y el H₂O₂ se agitaron a 24 °C durante 1 min y se añadió H₂SO₄ al 5% para detener la actividad enzimática; el H₂O₂ restante se midió con un espectrofotómetro a 270 nm y se registró como tiempo uno (T1). Para este análisis, se utilizó una muestra en blanco, que consistía en 100 µL de extracto de biomoléculas, 1 mL de buffer fosfato y 400 µL de H₂SO₄. Las unidades (UI) de actividad de la catalasa se expresaron como milimoles de H₂O₂ por minuto por proteína total [24].

Ascorbato peroxidasa (Apx)

Para analizar la APX, se colocaron en un tubo 0.1 mL de extracto de biomoléculas, 0.5 mL de ascorbato a una concentración de 10 mg·L⁻¹ y 1 mL de H₂O₂ al 100 mM y se dejaron reaccionar a temperatura ambiente. Después de 1 minuto, la reacción se detuvo con 0.4 mL de H₂SO₄ al 5%. La tasa de consumo de ascorbato se cuantificó mediante espectrofotometría a 266 nm. Las UI se expresaron como miligramos L⁻¹ de ascorbato por minuto por proteína total [25].

Glutación peroxidasa (Gpx)

La actividad del glutatión peroxidasa se midió utilizando H₂O₂ como sustrato. En un tubo de ensayo, se colocaron 200 µL de extracto de biomoléculas con 400 µL de glutatión reducido al 0.1 M y 200 µL de Na₂HPO₄ al 0.067 M. Esta mezcla se precalentó en un baño de agua a 25 °C durante 5 minutos, luego se añadieron 200 µL de H₂O₂ al 1.3 mM para iniciar la reacción catalítica. La reacción duró 10 minutos y se terminó añadiendo 1 mL de ácido tricloroacético al 1%, y se colocó en un baño de hielo durante 30 minutos. Luego, la mezcla se centrifugó durante 10 minutos a 3,000 rpm, se transfirieron 480 µL del sobrenadante obtenido a una cubeta; se añadieron 2.2 mL de Na₂HPO₄ al 0.32 M y 320 µL de ácido 5, 5'-ditiobis 2-nitrobenzoico (DTNB, producto Sigma, grado analítico) para el desarrollo del color. La actividad enzimática se determinó como la disminución de GSH dentro del tiempo de reacción; la UI se expresó como milimoles de GSH por minuto por proteína total [26].

Ascorbato (Asc), deshidroascorbato (dha) y ascorbato total (Asct)

A partir de los extractos de acetona:agua, se cuantificaron ascorbato y deshidroascorbato utilizando un cromatógrafo de líquidos de alta resolución (HPLC) (Thermo Spectra System P4000) con las siguientes condiciones: longitud de onda de 230 nm, fase móvil de NaH₂PO₄ al 50 mM (pH 2.8), tasa de flujo de 1 mL·min⁻¹ y uso de una columna AQUASIL C18 HPLC a 60 °C. Los resultados se expresaron en miligramos de ascorbato por kilogramo de tejido seco [27].

Glutación (Gsh)

El glutatión se cuantificó mediante una reacción con ácido 5,5-ditiobis-2-nitrobenzoico (DTNB). En un tubo de ensayo, se colocaron 480 µL de extracto de biomoléculas, después se añadieron 2.2 mL de Na₂HPO₄ al 0.32 M y 320 µL de tinte DTNB al 1.0 mM [28]. La solución se mezcló y luego se midió utilizando un espectrofotómetro UV-Vis a 412 nm. Las unidades se expresaron como miligramos de glutatión por kilogramo de tejido seco.

F. Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente al azar, con cinco tratamientos y diez repeticiones cada uno, donde cada planta constituyó una unidad experimental.

Primero se realizó un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA one-way), seguida de una prueba de medias de diferencia mínima significativa (LSD, *p* ≤ 0.05)

Posteriormente, con el fin de reducir la dimensionalidad de las variables, se realizó un análisis estadístico multivariado de componentes principales (CPS) con el uso del software R versión 3.1.

El objetivo de usar este análisis estadístico fue reducir la dimensionalidad explicando la mayor parte de la varianza y encontrar patrones en un gran conjunto de variables, sin asumir alguna distribución o relación entre ellas. Las interpretaciones se realizaron en función de la posición de cada una de las variables, la magnitud de los vectores, así como la ubicación de las especies químicas y concentraciones que se denominan individuos en el biplot (dentro de cada cuadrante).

III. RESULTADOS

En la Tabla I se muestran los resultados obtenidos de la biomasa y el rendimiento de las plantas de tomate tratadas con las diferentes concentraciones y especies químicas del yodo. Respecto a la biomasa y el rendimiento, la mayoría de las aplicaciones no fueron diferentes al control, pero las aplicaciones de yodato (KIO₃ 1 y 100 µM) mostraron un aumento significativo en la biomasa. En cuanto a la producción de frutos, no se encontraron diferencias entre los tratamientos y el testigo.

TABLA I
EFECTO DEL YODO SOBRE LA BIOMASA Y LA PRODUCCIÓN DE PLANTAS DE TOMATE

Tratamiento	Biomasa (g planta ⁻¹)	Producción (kg planta ⁻¹)
Control	33.14bc	2.19a
1 KI	54.73 b	2.54a
100 KI	45.5 bc	2.79a
1 KIO ₃	64.88 a	2.72a
100 KIO ₃	65.3 a	2.5a

Letras diferentes en una misma columna en cada experimento indican diferencias significativas, según LSD (*p* ≤ 0.05).

Los resultados obtenidos con el análisis de componentes principales (ver Fig. 1) mostraron una correlación positiva con la mayoría de los macronutrientes (N, P, K, Mg) y microelementos (Fe, Mn y Zn) después de la aplicación de yodato a concentraciones de 1 y 100 μM . También se pudo observar que la aplicación de yodato 1 μM tuvo una correlación positiva adicional con el Ca y el Zn.

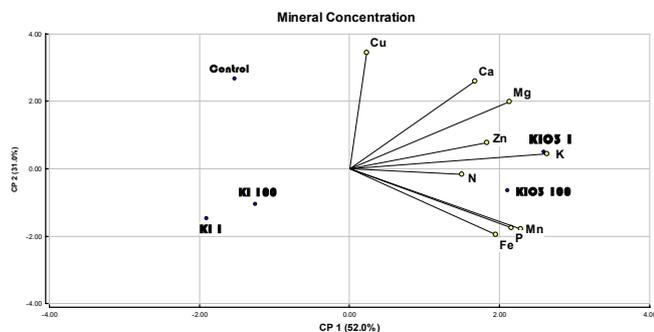


Fig. 1. Biplot que muestra la relación entre los minerales esenciales analizados y los diferentes tratamientos con yodo (KI 1= yoduro de potasio 1 μM , KI 100= yoduro de potasio 100 μM , KIO₃ 1= yodato de potasio 1 μM , KIO₃ 100 = yodato de potasio 100 μM , control = plantas sin aplicación de yodo)

Adicionalmente, se muestra un análisis de varianza y prueba de medias para visualizar los datos de la concentración de macro (Tabla II) y microelementos (Tabla III), con el fin de compararlos con el análisis multivariado. Y bajo la perspectiva univariada podemos observar una mayor concentración de N y P con la aplicación de KIO₃ 100 μM , una mayor contenido de los microelementos Fe y Mn con la aplicación de ambas concentraciones de KIO₃ y finalmente una mayor concentración de Cu con la aplicación de KIO₃ 1 μM . Por lo tanto, es posible concluir una tendencia similar bajo ambos tipos de análisis.

Tabla II
CONCENTRACIÓN DE MACROELEMENTOS ESCENCIALES EN FRUTOS DE TOMATE EN LOS TRATAMIENTOS Y EN EL CONTROL

Tratamiento	N (g kg ⁻¹)	P	K	Ca	Mg
Control	17.49 b	0.94 b	7.51 a	5.94 a	0.43 a
KI 1	15.65 b	1.92 ab	6.22 a	3.20 a	0.33 a
KI 100	16.55 b	2.36 ab	7.12 a	3.69 a	0.34 a
KIO ₃ 1	16.69 b	2.94 ab	10.65 a	5.75 a	0.51 a
KIO ₃ 100	24.61 a	4.09 a	10.74 a	5.68 a	0.45 a

Además de analizar el balance mineral, el metabolismo antioxidante fue sometido a un análisis multivariado en el que se convirtieron diez variables de dos componentes principales, que explicaron el 81,1 % de la varianza. En el biplot mostrado en la Fig. 2 es posible observar una correlación positiva entre mayoría de las variables y tratamientos de KI.

Sin embargo, al comparar las tendencias de los tratamientos con la de las plantas control se pudo notar que la aplicación de KI 1 μM tuvo correlación positiva con todas las enzimas con actividad antioxidante (Sod, Cat, Apx y Gpx), tendencia similar a lo observado con la aplicación de KIO₃ 100 μM . En cuanto a los antioxidantes no enzimáticos, se pudo observar una

correlación positiva con el ácido ascórbico (AsA), el deshidroascorbato (dha) y el ascorbato total (AsAt) con ambas concentraciones de KI, pero una correlación negativa con el glutatión. Finalmente, estos mismos tratamientos mostraron una correlación positiva con el potencial antioxidante y un caso opuesto al observado con el potencial redox. Y los de los tratamientos con KIO₃ no mostraron una correlación diferente a la observada con las plantas control. Ver Tabla IV.

Tabla III
CONCENTRACIÓN DE MICROELEMENTOS ESCENCIALES EN FRUTOS DE TOMATE EN LOS TRATAMIENTOS Y EN EL CONTROL

Tratamiento	Zn ppm	Mn ppm	Cu ppm	Fe ppm
Control	22.9 a	7.88 b	17.69 a	138 b
KI 1	21.16 a	12.66 ab	6.14 b	352 ab
KI 100	22.95 a	12.8 ab	7.26 b	358 ab
KIO ₃ 1	37.54 a	17.24 a	11.96 ab	524 a
KIO ₃ 100	22.50 a	17.64 a	8.58 b	406 a

Tabla IV
COMPARACIÓN DE LA TENDENCIA DE LAS PLANTAS TRATADAS CON LAS DE CONTROL

Tratamientos	Antioxidantes									
	Enzimático				No enzimático			Redox		
	Cat	Sod	Apx	Gpx	Gsh	AsA	dha	AsAt	PA	ORP
1 KI	++	+	++	++	-	+	+	+	+	-
100 KI	=	++	=	=	-	+	+	+	++	-
1 KIO ₃	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
100 KIO ₃	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-

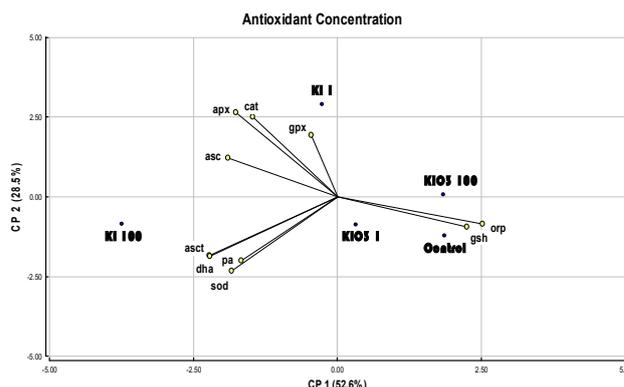


Fig. 2. Biplot que muestra la relación entre los antioxidantes analizados y los diferentes tratamientos con yodo (KI 1= yoduro de potasio 1 μM , KI 100= yoduro de potasio 100 μM , KIO₃ 1= yodato de potasio 1 μM , KIO₃ 100 = yodato de potasio 100 μM , control = plantas sin aplicación de yodo)

IV. DISCUSIÓN

En la presente investigación se encontró que ningún tratamiento tuvo un efecto negativo en el crecimiento y producción de frutos, hecho que evidencia la ausencia de toxicidad de este elemento en las plantas de tomate. Por el

contrario, la aplicación de KIO_3 en ambas concentraciones mostró un aumento de biomasa respecto a las plantas control. Diferentes estudios de aplicación de yodo en plantas cultivadas sin suelo han demostrado que el resultado depende principalmente de tres factores: la concentración, la forma química así como la susceptibilidad de la especie vegetal [29]. Se ha observado que la aplicación de bajas concentraciones ($\leq 5 \mu\text{M}$) de yodo induce un aumento de la biomasa en especies de hoja cultivadas sin suelo como la espinaca y la lechuga [30], [7]. Sin embargo, a concentraciones superiores ($\geq 5 \mu\text{M}$) que esto se ha encontrado una reducción en dicha variable [12], [31]. Algunos autores han demostrado que el tomate es capaz de soportar grandes cantidades (0,5-1 mM) de yodo sin afectar su crecimiento [15], [32]. Ligado al aumento de biomasa, se encontró correlación positiva con la concentración de nitrógeno, potasio, magnesio, hierro, manganeso y zinc luego de la aplicación de ambas concentraciones de yodato (KIO_3) a través de la perspectiva multivariada, y bajo análisis univariado una mayor concentración de nitrógeno, fósforo y hierro con la aplicación de KIO_3 100 μM . Así, en el presente experimento se evidenció una sinergia entre la absorción del yodo en su forma oxidada y la mayoría de los nutrientes macro y micro minerales. A la fecha, se han realizado pocos estudios al respecto [33], pero se han reportado cambios en el equilibrio de los elementos esenciales desde el punto de vista fisiológico en plantas de espinaca, pero con la aplicación de KIO_3 mediante fertirrigación se encontró un aumento de Fe y nitratos, teniendo como hipótesis una posible relación entre el metabolismo de IO_3 y NO_3 . Otra posible razón del efecto sinérgico sería el cambio que se produce tanto en el potencial redox (Eh) como en el potencial de hidrógeno (pH) tras la absorción y metabolización de este elemento [34], permitiendo así conducir a condiciones más adecuadas para la absorción de otros elementos esenciales.

La absorción de yodo vía foliar no está del todo dilucidada, pero la implicación de los estomas ha sido ampliamente discutida, aunque termodinámicamente esto sería complicado, se atribuiría más bien a la alta permeabilidad de la cutícula peristomal alrededor de las células guardas [35], encontrándose incluso una opción más ventajosa que la misma aplicación al suelo, debido a la compleja interacción con este metasistema y problemas como falta de disponibilidad o volatilización [36].

En cuanto al impacto del yodo sobre el sistema antioxidante, se observó que ambas concentraciones de KI condujeron a un aumento de los antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos. Y sólo la aplicación de KIO_3 100 μM incrementó la síntesis de Cat, Apx y Gpx, fenómenos que aún no se comprenden bien, pero se asocian con el mecanismo primario de defensa de las plantas superiores contra el estrés oxidativo, como es la síntesis de antioxidantes, que responden al aumento de especies reactivas del oxígeno (ROS), que son sobreproducidas por mecanismos metabólicos y con fines de señalización [37]. Por lo tanto, la acción del yodo probablemente esté relacionada con su poder redox, ya que tiene múltiples estados de valencia -1, 0, 1, 5 y 7 y su comportamiento depende del medio que lo rodea, actuando como donador o aceptor de electrones, y como un pro-oxidante en este caso [38]. También se encontró que la

aplicación de yodo tanto en forma orgánica como inorgánica a concentraciones de 10 y 25 μM produce un aumento en la concentración de dehidroascorbato, la forma oxidada estable de ascorbato (AsA) en plantas de tomate, lo que confirma el desempeño del yodo como pro-oxidante [33].

Contrario a los resultados encontrados por Medrano-Macías et al. 2016 [39] en plántulas de tomate, donde hubo una reducción de Sod, mientras que las enzimas desintoxicantes de las peroxidases Cat, Apx y Gpx no presentaron cambios sobre el estado basal, y se encontró un aumento de los antioxidantes no enzimáticos AsA y glutatión, sin afectar el crecimiento. Este hecho se relacionó con una probable acción del yodo como donador de electrones (antioxidante). Las discrepancias en el comportamiento del sistema antioxidante de plántulas y plantas adultas del presente experimento podrían radicar en el tiempo de exposición al yodo, la etapa de crecimiento de las plantas y el órgano analizado. Por otro lado, Blasco y colaboradores han estudiado el impacto del yodo en el metabolismo antioxidante en plantas de lechuga, en su primera prueba encontraron un aumento en la concentración de compuestos fenólicos, ácido ascórbico y potencial antioxidante, sin embargo, se observó que el mayor aumento se produjo con las concentraciones más altas de KI ($> 45 \mu\text{M}$) pero teniendo una reducción drástica de la biomasa, mientras que el IO_3 no mostró este daño [11]. Posteriormente realizaron aplicaciones de KI y KIO_3 , encontrando que la aplicación de KI a 80 μM indujo una reducción en la actividad de SOD y un aumento de Cat y L-galactosa deshidrogenasa, así como de los antioxidantes no enzimáticos glutatión y ascorbato, sin embargo, este resultado no fue favorable, ya que se observaron daños en el crecimiento de la planta [40]. Por otro lado, la aplicación de KIO_3 produjo un aumento en la actividad enzimática de Cat, Sod y Apx, principales enzimas en la desintoxicación causada por especies reactivas de oxígeno (ROS), también se encontró un aumento en el ácido ascórbico, comprobándose el efecto benéfico de esta especie química, sin evidencia de toxicidad al reducir la biomasa o la peroxidación lipídica. En otro estudio, se demostró un aumento en el potencial antioxidante y la acumulación en compuestos fenólicos después de la aplicación de KIO_3 en concentraciones de 20 y 40 μM [41].

García-Osuna et al. (2014) [12] reportaron un aumento del ácido ascórbico en plantas de *Opuntia ficus indica* sembradas en suelo en condiciones de microtúnel con la aplicación de KIO_3 a una concentración de 100 μM .

En general, los resultados aquí obtenidos coinciden con los reportados previamente; la aplicación de KI provoca una respuesta más fuerte que la obtenida por la especie oxidada KIO_3 , probablemente debido a una movilización y transporte más rápido del KI en forma reducida [42]. El KIO_3 puede transportarse de forma más lenta o dosificada creando sinergia con otros elementos.

V. CONCLUSIÓN

La aplicación de KIO_3 vía foliar a concentraciones de 1 y 100 μM promovió un aumento en la biomasa de las plantas de tomate, sin evidenciar cambios en la tasa de producción de frutos respecto a las plantas control. Este último tratamiento

(KIO₃ 100 µM) mostró una sinergia con la absorción y contenido de la mayoría de los macros y microminerales esenciales en los frutos.

La aplicación de KI incrementó el contenido de antioxidantes enzimáticos, no enzimáticos, así como el potencial antioxidante. La aplicación de KIO₃ 100 µM evidenció un aumento de las enzimas Cat, Gpx y Apx.

REFERENCIAS

- [1] S. Venturi and M. Venturi, "Evolution of Dietary Antioxidants: Role of Iodine," *Tutto Sulla Nutr.*, no. January 2007, pp. 1–25, 2007.
- [2] N. Gupta, M. Bajpai, R. Majumdar, and P. Mishra, "Response of iodine on antioxidant levels of Glycine max L. Grown under Cd²⁺ stress," *Adv. Biol. Res. (Rennes)*, vol. 9, no. 1, pp. 40–48, 2015, doi: 10.5829/idosi.abr.2015.9.1.9183.
- [3] B. Pauwels, "An investigation into the effects," no. 3, pp. 284–292, 1962.
- [4] A. Kabata-Pendias and H. Pendias, *Trace elements in Soils and Plants*. 2011.
- [5] J. Medrano-Macias, P. Lejja-Martínez, S. González-Morales, A. Juárez-Maldonado, and A. Benavides-Mendoza, "Use of Iodine to Biofortify and Promote Growth and Stress Tolerance in Crops," *Front. Plant Sci.*, vol. 7, 2016, doi: 10.3389/fpls.2016.01146.
- [6] B. Blasco *et al.*, "Study of the interactions between iodine and mineral nutrients in lettuce plants," *J. Plant Nutr.*, vol. 35, no. 13, pp. 1958–1969, Oct. 2012, doi: 10.1080/01904167.2012.716889.
- [7] H. X. Weng, J. K. Weng, A. L. Yan, C. L. Hong, W. Bin Yong, and Y. C. Qin, "Increment of iodine content in vegetable plants by applying iodized fertilizer and the residual characteristics of iodine in soil," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 123, no. 1–3, pp. 218–228, 2008, doi: 10.1007/s12011-008-8094-y.
- [8] D. C. Whitehead, "Uptake and distribution of iodine in grass and clover plants grown in solution culture," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 24, no. 1, pp. 43–50, 1973, doi: 10.1002/jsfa.2740240108.
- [9] Y.-G. G. Y. G. Zhu, Y. Z. Y.-Z. Huang, Y. Hu, and Y. X. Y.-X. Liu, "Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations," *Environ. Int.*, vol. 29, no. 1, pp. 33–7, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0160-4120(02)00129-0.
- [10] R. Li *et al.*, "Iodide and iodate effects on the growth and fruit quality of strawberry," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 97, no. 1, pp. 230–235, 2017, doi: 10.1002/jsfa.7719.
- [11] B. Blasco, J. J. Rios, L. M. Cervilla, E. Sánchez-Rodríguez, J. M. Ruiz, and L. Romero, "Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: Potential benefits for cultivation and human health," *Ann. Appl. Biol.*, vol. 152, no. 3, pp. 289–299, 2008, doi: 10.1111/j.1744-7348.2008.00217.x.
- [12] H. T. García Osuna, A. B. Mendoza, C. R. Morales, E. M. Rubio, J. V. Star, and R. M. Ruvalcaba, "Iodine application increased ascorbic acid content and modified the vascular tissue in *Opuntia Ficus-Indica* L.," *Pakistan J. Bot.*, vol. 46, no. 1, pp. 127–134, 2014.
- [13] A. Caffagni, L. Arru, P. Meriggi, J. Milc, P. Perata, and N. Pecchioni, "Iodine fortification plant screening process and accumulation in tomato fruits and potato tubers," *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, vol. 42, no. 6, pp. 706–718, 2011, doi: 10.1080/00103624.2011.550372.
- [14] C. Kiferle, S. Gonzali, H. T. Holwerda, R. R. Ibaceta, and P. Perata, "Tomato fruits: a good target for iodine biofortification," *Front. Plant Sci.*, vol. 4, no. June, p. 205, Jan. 2013, doi: 10.3389/fpls.2013.00205.
- [15] M. Landini, S. Gonzali, and P. Perata, "Iodine biofortification in tomato," *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, vol. 174, no. 3, pp. 480–486, 2011, doi: 10.1002/jpln.201000395.
- [16] N. K. Fageria, M. P. B. Filho, A. Moreira, and C. M. Guimarães, "Foliar fertilization of crop plants," *J. Plant Nutr.*, vol. 32, no. 6, pp. 1044–1064, 2009, doi: 10.1080/01904160902872826.
- [17] P. G. Lawson, D. Daum, R. Czauderna, H. Meuser, and J. W. Härtling, "Soil versus foliar iodine fertilization as a biofortification strategy for field-grown vegetables," *Front. Plant Sci.*, vol. 6, p. 450, Jan. 2015, doi: 10.3389/fpls.2015.00450.
- [18] A. A. Steiner, "A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition," *Plant Soil*, vol. 15, no. 2, pp. 134–154, 1961, doi: 10.1007/BF01347224.
- [19] K. Helrich, "AOAC. Official methods of analysis. 15. Arlington, VA, USA: Association of official Analytical Chemists," 1990, Accessed: May 16, 2017. [Online]. Available: https://scholar.google.com.mx/scholar?q=AOAC+%281990%29.+In+K.+Helrich+%28Ed.%29%2C+Official+Methods+of+Analysis+%2815th+ed.%29.+Arlington%2C+VA%2C+USA%3A+Association+of+Official+Analytical+Chemists%2C+Inc&btnG=&hl=es&as_sdt=0%2C5.
- [20] L. Muller, "Device for varying the frequency of a vibration exciter," *US Pat. 3,004,389*, 1961, Accessed: May 16, 2017. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US3004389>.
- [21] S. J. Ramos *et al.*, "Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite," *Plant, Soil Environ.*, vol. 56, no. 12, pp. 584–588, 2010, doi: 10.17221/113/2010-PSE.
- [22] Z. Yu and R. A. Dahlgren, "Evaluation of methods for measuring polyphenols in conifer foliage," *J. Chem. Ecol.*, vol. 26, no. 9, pp. 2119–2140, 2000, doi: 10.1023/A:1005568416040.
- [23] P. Ahmad, M. Sarwat, and S. Sharma, "Reactive oxygen species, antioxidants and signaling in plants," *J. Plant Biol.*, vol. 51, no. 3, pp. 167–173, 2008, doi: 10.1007/BF03030694.
- [24] A. Cansev, H. Gulen, and A. Eris, "The activities of catalase and ascorbate peroxidase in olive (*Olea europaea* L. cv. Gemlik) under low temperature stress," *Hortic. Environ. Biotechnol.*, vol. 52, no. 2, pp. 113–120, 2011, doi: 10.1007/s13580-011-0126-4.
- [25] Y. Nakano and K. Asada, "Purification of Ascorbate Peroxidase in Spinach Chloroplasts; Its Inactivation in Ascorbate-Depleted Medium and Reactivation by Monodehydroascorbate Radical," *Plant Cell Physiol.*, vol. 28, no. 1, pp. 131–140, 1987, doi: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a077268.
- [26] T. Quiterio-Gutiérrez *et al.*, "The application of selenium and copper nanoparticles modifies the biochemical responses of tomato plants under stress by *Alternaria Solani*," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 20, no. 8, 2019, doi: 10.3390/ijms20081950.
- [27] V. Nour, I. Trandafir, and M. E. Ionica, "HPLC organic acid analysis in different citrus juices under reversed phase conditions," *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca*, vol. 38, no. 1, pp. 44–48, 2010, doi: 10.15835/nbha3814569.
- [28] T. Xue, H. Hartikainen, and V. Piironen, "Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce," *Plant Soil*, vol. 237, no. 1, pp. 55–61, 2001, doi: 10.1023/A:1013369804867.
- [29] P. Lejja-Martínez, A. Benavides-Mendoza, A. Rocha-Estrada, and J. R. Medrano-Macias, "Biofortificación con yodo en plantas para consumo humano," *Rev. Mex. Ciencias Agrícolas*, vol. 7, no. 8, p. 2025, 2017, doi: 10.29312/remexca.v7i8.134.
- [30] B. Blasco, R. Leyva, L. Romero, and J. M. Ruiz, "Iodine effects on phenolic metabolism in lettuce plants under salt stress," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 61, no. 11, pp. 2591–2596, 2013, doi: 10.1021/jf303917n.
- [31] S. Smoleń, I. Kowalska, and W. Sady, "Assessment of biofortification with iodine and selenium of lettuce cultivated in the NFT hydroponic system," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 166, pp. 9–16, 2014, doi: 10.1016/j.scienta.2013.11.011.
- [32] C. Kiferle *et al.*, "Effect of Iodine treatments on *Ocimum basilicum* L.: Biofortification, phenolics production and essential oil composition," *PLoS One*, vol. 15, no. 2, pp. 1–23, 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0229016.
- [33] S. Smoleń and W. Sady, "Influence of iodine form and application method on the effectiveness of iodine biofortification, nitrogen metabolism as well as the content of mineral nutrients and heavy metals in spinach plants (*Spinacia oleracea* L.)," *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 143, no. 2012, pp. 176–183, 2012, doi: 10.1016/j.scienta.2012.06.006.
- [34] S. Venturi, "Evolutionary Significance of Iodine," *Curr. Chem. Biol.*, vol. 5, no. 3, pp. 155–162, 2011, doi: 10.2174/187231311796765012.
- [35] W. Franke, "The basis of foliar absorption of fertilizers with special regard to the mechanisms," *Foliar Fertil.*, 1986, Accessed: May 16, 2017. [Online]. Available: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-4386-5_2.
- [36] P. G. Lawson, D. Daum, R. Czauderna, H. Meuser, and J. W. Härtling, "Soil versus foliar iodine fertilization as a biofortification strategy for field-grown vegetables," *Front. Plant Sci.*, vol. 6, no. June, p. 11, 2015, doi: 10.3389/fpls.2015.00450.
- [37] C. H. Foyer and G. Noctor, "Redox Signaling in Plants," *Antioxid. Redox Signal.*, vol. 18, no. 16, pp. 2087–2090, 2013, doi: 10.1089/ars.2013.5278.
- [38] F. C. Küpper *et al.*, "Iodide accumulation provides kelp with an inorganic antioxidant impacting atmospheric chemistry," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 105, no. 19, pp. 6954–8, May 2008, doi: 10.1073/pnas.0709959105.

- [39] J. Medrano-Macías and P. Lejía-Martínez, "Effect of iodine application on antioxidants in tomato seedlings," *Rev. Chapingo*, 2016, Accessed: May 16, 2017. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Adalberto_Benavides-Mendoza/publication/306960954_Effect_of_iodine_application_on_antioxidants_in_tomato_seedlings_Efecto_de_la_aplicacion_de_yodo_sobre_antioxidantes_en_plantulas_de_jitomate/links/57c0c8c308ae2f5eb3322725.pdf.
- [40] B. Blasco *et al.*, "Does iodine biofortification affect oxidative metabolism in lettuce plants," *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 142, no. 3, pp. 831–842, 2011, doi: 10.1007/s12011-010-8816-9.
- [41] R. Leyva *et al.*, "Beneficial effects of exogenous iodine in lettuce plants subjected to salinity stress," *Plant Sci.*, vol. 181, no. 2, pp. 195–202, 2011, doi: 10.1016/j.plantsci.2011.05.007.
- [42] S. Kato *et al.*, "Rice (*Oryza sativa* L.) roots have iodate reduction activity in response to iodine.," *Front. Plant Sci.*, vol. 4, no. 3, p. 227, 2013, doi: 10.3389/fpls.2013.00227.