

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



BIOFORTIFICACIÓN CON YODO EN PLANTAS PARA CONSUMO HUMANO

Artículo

Que presenta PAOLA CATALINA LEIJA MARTÍNEZ

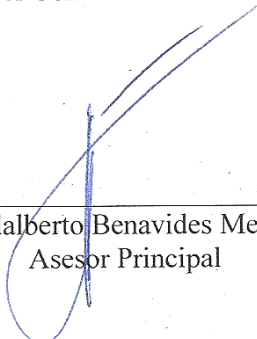
como requisito parcial para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

APLICACIÓN DE YODO Y SU EFECTO EN EL METABOLISMO REDOX DE
Solanum lycopersicum L.

Investigación

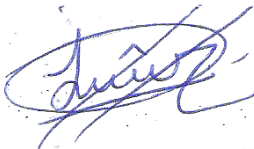
Elaborada por PAOLA CATALINA LEIJA MARTÍNEZ como requisito parcial para
obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura con la supervisión y aprobación
del Comité de Asesoría



Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Asesor Principal



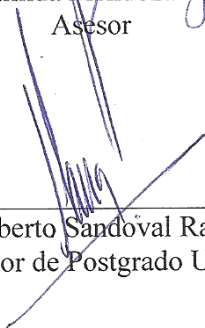
Dr. Valentín Robledo Torres
Asesor



Dr. Antonio Juárez Maldonado
Asesor



Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal
Asesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Subdirector de Postgrado UAAAN

Saltillo, Coahuila

Julio 2016

AGRADECIMIENTOS

Al **CONACyT**, por el apoyo económico brindado durante el tiempo de mi formación en la Maestría en Ciencias en Horticultura

A la **UAAAN**, mi Alma Terra Mater por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios.

Al **Dr. Adalberto Benavides Mendoza**, por haber contribuido de manera significativa en mi formación profesional y científica.

A la **QFB Julia Medrano Macías, Dra. Susana González Morales, Dr. Antonio Juárez Maldonado**, y al **Dr. Marcelino Cabrera De La Fuente** por su colaboración en el presente trabajo y apoyo en proyectos de investigación adicionales.

Al **Dr. Valentín Robledo Torres, Dra. Rosalina Mendoza Villarreal** y al **Dr. Luis Alonso Valdéz Aguilar**, por todos los conocimientos adquiridos durante mi formación académica y asesoramiento en la realización de mi investigación.

A mis compañeros, **Martín Tucuch, Carlos Díaz, Raquel Luna, Estevan Vázquez, Zeus Pinedo, Ema García, William Narvaez, Irma Dávila, Enrique Canales**, y **Gerardo Salas**, por su amistad, consejos y recomendaciones para la ejecución de mi investigación.

Al cuerpo académico del **departamento de Horticultura**, por todos los conocimientos compartidos, consejos y por cada lección aprendida de ellos, gracias.

DEDICATORIA

A mis padres, **Anastasio Leija** y **Silvia Catalina Martínez**, por haberme apoyado y tener fe en mí en todo momento.

A mi novio, **Jesús Ángel Mendoza Tovar**, por su amor, apoyo incondicional y por impulsarme a dar siempre lo mejor de mí misma.

Texcoco, Estado de México, 11 de abril de 2016
Ref.: 916-15

Dra. Julia Rosa Medrano-Macías
Universidad Autónoma de Nuevo León
Presente

Por medio de la presente se hace constar que el manuscrito titulado: **“Biofortificación con yodo en plantas para consumo humano”**, del cual son autores(as): **Paola Leija-Martínez, Adalberto Benavides-Mendoza, Alejandra Rocha-Estrada y Julia Rosa Medrano-Macías**, fue **aceptado** para ser publicado en el Vol. **7** Núm. **8**, del 12 de noviembre – 31 de diciembre de 2016 en la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente



DRA. DORA MA. SANGERMAN-JARQUÍN
EDITORA EN JEFA DE LA REVISTA
MEXICANA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

c.c.p. * Archivo
DRSJ/gfg

BIOFORTIFICACIÓN CON YODO EN PLANTAS PARA CONSUMO HUMANO

IODINE BIOFORTIFICATION IN PLANTS FOR HUMAN CONSUPTION

Paola Leija-Martínez ⁽¹⁾, Adalberto Benavides-Mendoza ⁽¹⁾, Alejandra Rocha-Estrada ⁽²⁾,

Julia Rosa Medrano-Macías*⁽²⁾

(1) Depto. de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria *Antonio Narro*. Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo, Coahuila, México C.P. 25315

(2) Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. Ave. Pedro de Alba s/n, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León. C.P. 66450.

* *Autor para correspondencia* (jmedmac@gmail.com)

RESUMEN

En el presente trabajo se describe la problemática de salud debido al consumo insuficiente del yodo, así como las alternativas que han sido empleadas para mitigar este problema global, tanto las tradicionales como la yodatización de sal de mesa hasta las nuevas tendencias de biofortificación con yodo en las principales plantas de consumo humano. Se incluyen los mecanismos de absorción, volatilización y transporte del yodo en las plantas, distinguiendo entre especies marinas y terrestres. Se mencionan asimismo los resultados obtenidos en algunos estudios de biofortificación, citando las diferentes formas de aplicación y las diferencias obtenidas entre los sistemas de cultivo en suelo y sin suelo.

Palabras clave: yodatización, fortificación con yodo, absorción de yodo, desorden por deficiencia de yodo, haloperoxidasas.

ABSTRACT

The current review describes the health problems due to insufficient intake of iodine, and the alternatives that have been employed to mitigate this global problem, both traditional as salt iodization even the new trends biofortification with iodine in the main plants for human

consumption. Absorption mechanisms, volatilization and transport of iodine in plants are included, remarking between the marine and terrestrial plants. Is cited also several results obtained from biofortification research made over soil and in water culture.

Key words: iodization, iodine fortification, iodine absorption, iodine deficiency disorders, haloperoxidase.

INTRODUCCIÓN

El consumo insuficiente de los micronutrientes través de los alimentos causa una malnutrición mineral en humanos. Hasta ahora se han determinado 11 elementos traza que son esenciales para el desarrollo y crecimiento adecuado de los humanos (Fraga, 2006). Algunos de estos elementos son requeridos en cantidades tan pequeñas que su deficiencia puede llegar a ser rara o incluso desconocida (Stein, 2009). De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) las deficiencias nutrimentales más comunes son las de hierro (Fe), zinc (Zn), yodo (I) y Vitamina A (Burlingame, 2013) (Figura 1).

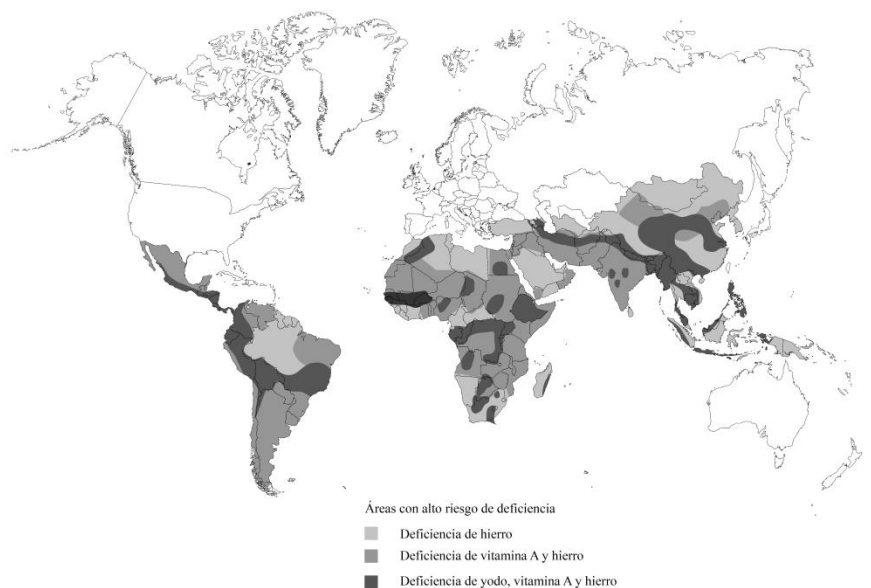


Figura 1. Deficiencias nutrimentales más comunes. (Modificado de Burlingame, 2013, *Frontiers in agricultural sustainability: Studying the protein supply chain to improve dietary quality.*)

Entre las causas de la desnutrición mineral se encuentran la distribución irregular de los elementos en los suelos y el empobrecimiento de los suelos de uso agrícola por la producción intensiva y la falta de un buen manejo (Vir, 2012).

Uno de los elementos más estudiados debido a su importancia metabólica en mamíferos es el yodo. La deficiencia de este elemento se presenta en muchas regiones del planeta pero es más pronunciada en áreas montañosas y llanuras, esto ocasionado por la distribución irregular del yodo en la corteza terrestre (FAO, 2009). Se estima que 2000 millones de personas viven con una ingesta insuficiente de este elemento (Mottiar, 2013), provocando los denominados desórdenes por deficiencia de yodo (DDY) (Weng *et al.*, 2008) Los DDY se refieren a todos los desórdenes asociados con la baja ingesta de yodo y que pueden ser prevenidos asegurando el consumo adecuado del elemento (WHO, 2001). Los DDY ocurren cuando la ingesta y asimilación de yodo es más baja que la cantidad requerida por la glándula tiroidea para sintetizar suficientes cantidades de las hormonas tiroxina y triyodotironina. El DDY más conocido por su clara sintomatología es el bocio, sin embargo, en las últimas décadas se ha reconocido la presencia de desórdenes menos obvios desde el punto de vista de la sintomatología, tales como el impacto adverso del consumo insuficiente de yodo en el desarrollo mental y físico en niños así como en la productividad de los adultos (Lazarus, 2015).

Adicional a la importancia del consumo de yodo, justificada por la esencialidad para el funcionamiento adecuado de la glándula tiroidea, se ha demostrado recientemente una función distinta a la ya mencionada, asociada con la carcinogénesis y su tratamiento en diversas líneas celulares, mostrando que el yodo es capaz de actuar de dos formas: como antioxidante y como antiproliferativo de células malignas (Aceves y Anguiano, 2009). En bajas concentraciones el yodo puede neutralizar directamente radicales hidroxilo ($\text{HO}\bullet$) y adicionalmente en su forma oxidada (I_2) compite con las especies reactivas del oxígeno (ROS) por varios componentes celulares disminuyendo significativamente la lipoperoxidación. En altas concentraciones el yodo actúa como un oxidante moderado, disipando el potencial de membrana mitocondrial y

promoviendo la apoptosis en células cancerosas. (Arroyo *et al.*, 2006; Shrivastava *et al.*, 2006; Torremante y Rosner, 2011)

Los requerimientos diarios de yodo, de acuerdo con las Recommended Dietary Allowances (RDA) (WHO, 2011; Andersson *et al.*, 2011), son mostrados en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Ingesta diaria recomendada de yodo.

Cantidad diaria	Edad
90 µg	Infantes (0-59 meses)
120 µg	Niños (6-12 años)
150 µg	Adultos (Mayores de 12 años)
200 µg	Embarazo y lactancia

Se han realizado numerosos intentos para mitigar el déficit en el consumo del yodo, principalmente mediante la yodatización universal de la sal de mesa desde la década de 1920 (De Caffarelli *et al.*, 1997; Zimmermann, 2009; Charlton *et al.*, 2013). Sin embargo a través de los años se ha demostrado que esta técnica por sí sola es insuficiente para asegurar el requerimiento total de yodo (De Benosit *et al.*, 2008). Adicionalmente, en la mayoría de los países industrializados el consumo de sal de mesa va en disminución (Hetzl y Standbry, 1980) además de que se ha demostrado que el yodo en la sal de mesa se volatiliza (Lailou *et al.*, 2015). Por otra parte, el consumo de yodo en formas orgánicas se considera más adecuado (Weng *et al.*, 2014), ya que también se han evidenciado casos de bocio endémico asociado al exceso en el consumo de yodo inorgánico (Zhao *et al.*, 2000).

Debido a lo anterior, se hace necesario aumentar el uso de técnicas como la biofortificación de los cultivos para lograr un consumo adecuado de yodo, ya sea como complemento o como alternativa a la yodatización de la sal de mesa.

El objetivo de este escrito es revisar los avances acerca de la aplicación de yodo en plantas y de la biofortificación de cultivos con este elemento.

Disponibilidad del Yodo en los Alimentos

El mayor reservorio de yodo se encuentra en el mar; de allí se moviliza a las zonas terrestres a través de formas químicas volátiles producidas por algas marinas o bien por aerosoles marinos arrastrados por los vientos lo cual explica porque los suelos alejados del océano generalmente están desabastecidos de yodo y por consiguiente las plantas que crecen o se cultivan en estos suelos tendrán baja concentración del elemento (Zimmermann, 2009).

No se considera al yodo como un elemento esencial para las plantas terrestres, aunque diversos estudios demostraron que estas absorben y acumulan yodo (Mackowiak y Grossl, 1999; Zhu *et al.*, 2003). Esta aparente no esencialidad explica el porqué el yodo no se contempla en los programas de fertilización mineral de los cultivos, ello a pesar de que se ha demostrado que el aporte de sales inorgánicas de yodo permite elevar la tolerancia al estrés en las plantas (Gupta *et al.*, 2015; Leyva *et al.*, 2011). El no incluir fertilizantes con yodo para los cultivos, ocasiona que el contenido de este elemento en los alimentos vegetales y animales dependa exclusivamente de la disponibilidad natural del elemento en el suelo y en el agua. Por tal razón, hasta la fecha, la principal fuente de yodo para la mayoría de la población mundial es el aporte de sales inorgánicas (yoduro y yodato de potasio: KI y KIO₃) en la sal de mesa, agregando de 20 a 40 mg de yodo por kg de sal siguiendo los lineamientos de WHO/ UNICEF/ International Council for the Control of Iodine Deficiency Disorders (WHO, 2007; FAO, 2009; Zimmermann, 2009).

Disponibilidad del Yodo en el Suelo

La concentración de yodo disponible en el suelo se encuentra en función de la distancia al océano así como de la composición del material madre del suelo. Las zonas montañosas, los valles y las planicies del interior de los continentes muestran bajas concentraciones de yodo (Aston y Brazier, 1979). Se ha señalado que el yodo es único entre los elementos en consideración a su comportamiento geoquímico. La mayoría de los elementos disponibles en el suelo proviene del desgaste de la litosfera, y en general este no es el caso del yodo (Fuge y Jhonson, 1986). Este elemento muestra un amplio rango de concentraciones en el suelo, desde <0.1 hasta 150 mg kg^{-1} . Se considera que la concentración de yodo en el suelo es generalmente más alta que la encontrada en la roca madre del suelo. Los geoquímicos concuerdan con esto último debido a que el mayor abastecimiento de yodo en el suelo proviene de la atmósfera que a su vez esta lo recibe del entorno marino (Fuge, 2013).

Entre los factores edáficos que modifican la disponibilidad y absorción del yodo del suelo se encuentran: la cantidad de materia orgánica, la cual permite mayor absorción del yodo por las plantas, sobre todo cuando este se encuentra en forma de yodato (IO_3^-) (Seki *et al.*, 1984). Este efecto parece depender de la habilidad de las sustancias húmicas para adsorber el yodo (proceso al parecer mediado por microorganismos) disminuyendo su volatilización (Bostock, 2003), si bien en ausencia de materia orgánica parece ocurrir gran actividad de volatilización de yodo en forma de CH_3I a través de la actividad microbiana (Amachi *et al.*, 2003). Este hecho pudiera explicar en parte la aparente relación negativa entre el contenido de arcillas del suelo y la absorción de yodo por las plantas, mientras que el pH del suelo no parece ejercer efecto alguno en el intervalo de 5.4 a 7.6 (Shinonaga *et al.*, 2001).

Contenido de Yodo en las Plantas

La concentración de yodo encontrada normalmente en tejidos vegetales va de 0.1 a $1 \mu\text{g g}^{-1}$, pudiendo alcanzar hasta $3 \mu\text{g g}^{-1}$ ó más (Benton Jones, 1998). En un estudio llevado a cabo por Shinonaga y colaboradores (2001) se estableció que la concentración de yodo en cereales de

grano de zonas agrícolas continentales de Europa fue particularmente baja, con valores de 0.002 a 0.03 $\mu\text{g g}^{-1}$, en comparación con los de suelos cercanos al océano. Poco se conoce sobre la forma en que éste elemento es acumulado en plantas terrestres, sin embargo, en una investigación realizada en plantas de calabaza se dedujo mediante un estudio con microscopia electrónica que al aplicarse yodo inorgánico y orgánico directamente al sustrato, la mayor parte del yodo se acumuló en la raíz, mientras otra pequeña porción fue transportada a las partes aéreas para almacenarse en los cloroplastos (Weng *et al.*, 2008a), hecho que pudiera explicar parcialmente su carácter de inductor de tolerancia frente a algunos tipos de estrés ya que un volumen importante de la maquinaria antioxidante celular se encuentra en los cloroplastos.

Fertilización con Yodo para la Biofortificación en Sistemas de Cultivo sin Suelo

El contenido de yodo en las plantas generalmente aumenta al aplicar el yodo como yoduro, yodato u otras formas químicas (Weng *et al.*, 2008b). Los mejores resultados se han obtenido al aplicar los compuestos de yodo en la solución nutritiva o por aspersión foliar. En cada especie vegetal los resultados son variables en el sentido que se modifica la respuesta frente a la concentración y cambia la distribución en los órganos de la planta. Por ejemplo en un estudio llevado a cabo en espinaca bajo cultivo hidropónico se aplicaron diferentes formas químicas de yodo como ácido yodo acético, yoduro y yodato y se comprobó que con concentraciones mayores a 0 y hasta 1 mg L^{-1} la tasa de absorción del yodo aumentó linealmente frente a la concentración, manteniendo una proporción de concentración de 1:1 en raíces y hojas. Se mostró el siguiente orden de acumulación con las diferentes formas de yodo $\text{CH}_2\text{ICOO}^- > \text{I}^- > \text{IO}_3^-$. Adicionalmente se comprobó que inclusive con estas bajas concentraciones se obtuvo un incremento de la biomasa en estas plantas (Weng *et al.*, 2008c). Por su parte Blasco y colaboradores (2008) demostraron que aplicando yodo en concentraciones $\leq 5.1 \text{ mg L}^{-1}$ de yoduro (I^-) en lechuga hidropónica se obtuvo una adecuada acumulación de yodo foliar, la cual fue de 900 $\mu\text{g g}^{-1}$ de tejido seco, cantidad que es suficiente para cumplir la demanda diaria de consumo de yodo en humanos (150 $\mu\text{g/día}$) (Charlton *et al.*, 2013) cuando se consumen entre 17

y 200 gr de tejido fresco de lechuga por semana, ya que esta concentración no excede la máxima cantidad recomendada la cual es de 2 mg por día. Sin embargo a concentraciones superiores a 5.1 mg L⁻¹ de yoduro se presentaba una reducción significativa en la biomasa, caso que no sucedió aplicando las mismas concentraciones de yodato.

Zhu *et al.*, (2003) estudiaron la absorción del yodo en plantas de espinaca bajo cultivo hidropónico a concentraciones de 0.127, 1.27, 6.35 y 12.7 mg L⁻¹ de yoduro y yodato, encontrando como resultado que con 12.7 mg L⁻¹ de yoduro hubo efectos negativos en el crecimiento de las plantas, mientras que con esta misma concentración de yodato ocurrió solo un pequeño efecto sobre la biomasa de la planta. Sin embargo las concentraciones bajas, tal como 0.127 mg L⁻¹ de yoduro y yodato resultaron en una adecuada acumulación de este elemento, presentando 3.0 y 1.8 µg I g⁻¹ de peso fresco, la cual se considera adecuada

Voogt y colaboradores (2010) realizaron otro experimento de biofortificación con yodo en forma de yoduro y yodato en plantas de lechuga, aplicaron concentraciones muy bajas de estas formas químicas, las cuales oscilaban entre 0.013 y 0.129 mg L⁻¹, encontrando que en ninguna de las concentraciones mostraron efecto tóxico en las plantas de lechuga y con la concentración de 0.129 mg L⁻¹ de yoduro obtuvieron una acumulación de 0.653 y 0.764 µg I g⁻¹ de tejido fresco, cinco veces menos de la concentración obtenida al aplicar yodato.

En la actualidad existe un creciente interés en la suplementación con yodo en la cadena alimenticia mediante la captación y acumulación de este elemento en plantas de consumo humano (Nestel, 2006), los resultados positivos antes descritos, principalmente en especies hortícolas en sistemas sin suelo son importantes y sugieren que son buenos candidatos para los programas de biofortificación con yodo, sin embargo, el verdadero reto es la biofortificación de cultivos en sistemas extensivos en suelo, dado que es lo que permitiría una cobertura realmente amplia de la población objetivo.

Fertilización con Yodo para la Biofortificación de Cultivos en Suelo

La adición de yodo al suelo permite ampliar el espectro de especies vegetales para biofortificación (Cui y Song, 2003), incluyendo además de las hortalizas a las medicinales e inclusive cultivos básicos (Yuita, 1992) que normalmente se cultivan en campo abierto.

En el suelo pueden coexistir diversas formas químicas de yodo, entre las más abundantes se encuentran el yodato (IO_3) y el yoduro (I^-) (Borst Pauwels, 1962). Algunos estudios realizados de aplicación de yodo al suelo han demostrado que las plantas pueden tolerar mayores concentraciones de yodato que de yoduro (Dai *et al.*, 2006; Smolen *et al.*, 2012) y que muy bajas concentraciones de yodo ($0.02\text{-}0.2 \text{ mg kg}^{-1}$) sin importar la forma, son benéficas para varias plantas de cultivo, sobre todo para las de carácter halofítico (Borst Pauwels, 1961; Dai *et al.*, 2006; Smolen y Sandy, 2012). Dai y colaboradores (2006) llevaron a cabo la aplicación de yoduro y yodato de potasio directamente al suelo para biofortificar plantas de lechuga observando que la mayor acumulación de este elemento fue obtenido con los tratamientos de yodato. Caso contrario a lo ocurrido al aplicar el yoduro y yodato de potasio mediante hidroponía en plantas de lechuga y arroz (Mackowiak y Grossl, 1999; Zhu *et al.*, 2003). En estudios realizados en plantas de arroz se ha demostrado que estas tienen la capacidad de reducir el yodato a yoduro, hecho que parece conferirles flexibilidad metabólica frente al yodo (Kato *et al.*, 2013). Por otra parte, Weng *et al.* (2003) encontraron que al aplicar algas kelp y tierra de diatomeas al suelo se logró elevar la disponibilidad de yodo para las hortalizas bajo cultivo. Los mismos autores encontraron que la absorción de yodo por hortalizas estaba en función directa de la concentración del elemento en el suelo, hasta alcanzar un límite que se presentó diferente para cada especie vegetal. En un estudio reciente Weng *et al.* (2014) demostraron que es posible usar la composta con algas marinas incorporada al suelo como un mecanismo de fertilización con yodo.

No se conoce el origen de las diferencias en la absorción de yoduro o yodato en el suelo y en las soluciones nutritivas. Se atribuyen en parte a la sustancial volatilización del yodo del

sistema planta-suelo hacia la atmósfera mediada por diferentes microorganismos (Muramatsu *et al.*, 1995; Fuge, 1996). Sin embargo, se tiene evidencia que la síntesis de las formas volátiles de yodo, llamadas organoyodados, provienen principalmente de la forma química yoduro (Keppler *et al.*, 2003) este hecho pudiera parecer contradictorio ya que el yoduro es la forma química que absorben más fácilmente las plantas del suelo.

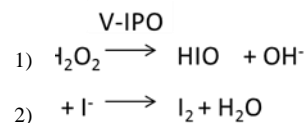
El yodo contenido en el agua de riego puede ser una fuente de este elemento para las plantas, sin embargo es poco probable que el agua contenga niveles adecuados de yodo en regiones en donde el suelo presente concentraciones bajas del elemento. La aplicación de yodo como yodato de potasio en el agua de riego ($0.010\text{-}0.080\text{ mg L}^{-1}$ por cuatro semanas) fue efectiva durante cuatro años para elevar la concentración de yodo en suelos y plantas en regiones de China con severa deficiencia de yodo (Jiang *et al.*, 1998). En otro estudio Caffagini *et al.* (2011) realizaron la aplicación de yoduro y yodato mediante irrigación a concentraciones de 500 y 1000 mg L^{-1} y 500, 1000, 2000 y 5000 mg L^{-1} , respectivamente, en cebada, maíz, tomate y papa. Encontrándose resultados favorables únicamente en los frutos de tomate y tubérculos de papa alcanzando concentraciones de 272 a 6245 $\mu\text{g I}$ por cada 100 g de peso fresco y de 527 a 5375 $\mu\text{g I}$ por cada 100 g de peso fresco, respectivamente. Las concentración de yodo alcanzada en los frutos de tomate de las plantas tratadas con yoduro a 500 mg L^{-1} fue siete veces más elevada que la concentración alcanzada con la aplicación de yodato en 500 mg L^{-1} ($3900\text{-}527\text{ }\mu\text{g}/100\text{ g}$). De igual modo sucedió en el caso de los tubérculos de papa, en donde la concentración alcanzada con la aplicación de yoduro a 500 mg L^{-1} fue siete veces mayor que la concentración alcanzada con la aplicación de yodato a 500 mg L^{-1} (1875 versus 272 $\mu\text{g I}$ por 100 g de peso fresco). Lo cual corroboró la mayor facilidad de absorción del yoduro frente al yodato.

Una forma para evitar la complejidad de los fenómenos de absorción y transporte del yodo cuando este se aplica al suelo, es aplicarlo por medio de aspersión foliar en forma de yoduro y yodato (Zanirato y Mayerle, 2009), encontrándose buenos resultados al compararlo con las aplicaciones al suelo (Lawson *et al.*, 2015). En otro estudio reciente Tonacchera *et al.* (2013)

lograron aumentar la concentración de yodo en papa, zanahoria, tomate y lechuga aplicando yodo como aspersión foliar. Los resultados obtenidos indicaron que las partes comestibles de las plantas alcanzaron hasta el 30% de la recomendación diaria (RDA) de consumo de yodo sin afectar otros aspectos de la calidad de los alimentos.

Mecanismos de Absorción y Transporte del Yodo

Las plantas marinas se encuentran inmersas en un medio rico en yodo, por ello constituyen el modelo más sencillo para estudiar el fenómeno de la absorción del yodo. De acuerdo con el mecanismo propuesto por Küper *et al.* (1998), la absorción del yodo en las algas café ocurre mediante el paso del yoduro presente en el apoplasto a través de la pared celular por medio de la enzima yodo peroxidasa dependiente de vanadio (V-IPO) (Truesdale *et al.*, 1995; Colin *et al.*, 2003; Winter y Moore, 2009) la cual cataliza la oxidación del yoduro a ácido hipoyodoso (HIO), como se muestra en la reacción 1:



Adicionalmente el ácido hipoyodoso puede reaccionar de forma espontánea con el yoduro manteniendo un equilibrio de reacción en medio acuoso como se muestra en la reacción 2 (Truesdale *et al.*, 1995).

Cuando las algas están sujetas a un nivel bajo de estrés oxidativo, el I₂ formado en la reacción (2) puede atravesar la membrana celular, someterse a una reducción en el citoplasma y luego almacenarse como yoduro en la vacuola, de donde se movilizará en momentos de estrés oxidativo. En cambio, cuando las algas son sometidas a un nivel alto de estrés oxidativo el I₂ se volatilizará a la atmosfera (Le Blanc *et al.*, 2006; Kupper *et al.*, 2008). El mismo destino puede sufrir el HIO, ya que puede acumularse en las vacuolas o bien reaccionar con compuestos

orgánicos formando principalmente metil-yoduro (CH_3I) que será volatilizado (Le Barre *et al.*, 2008). Ver figura 2.

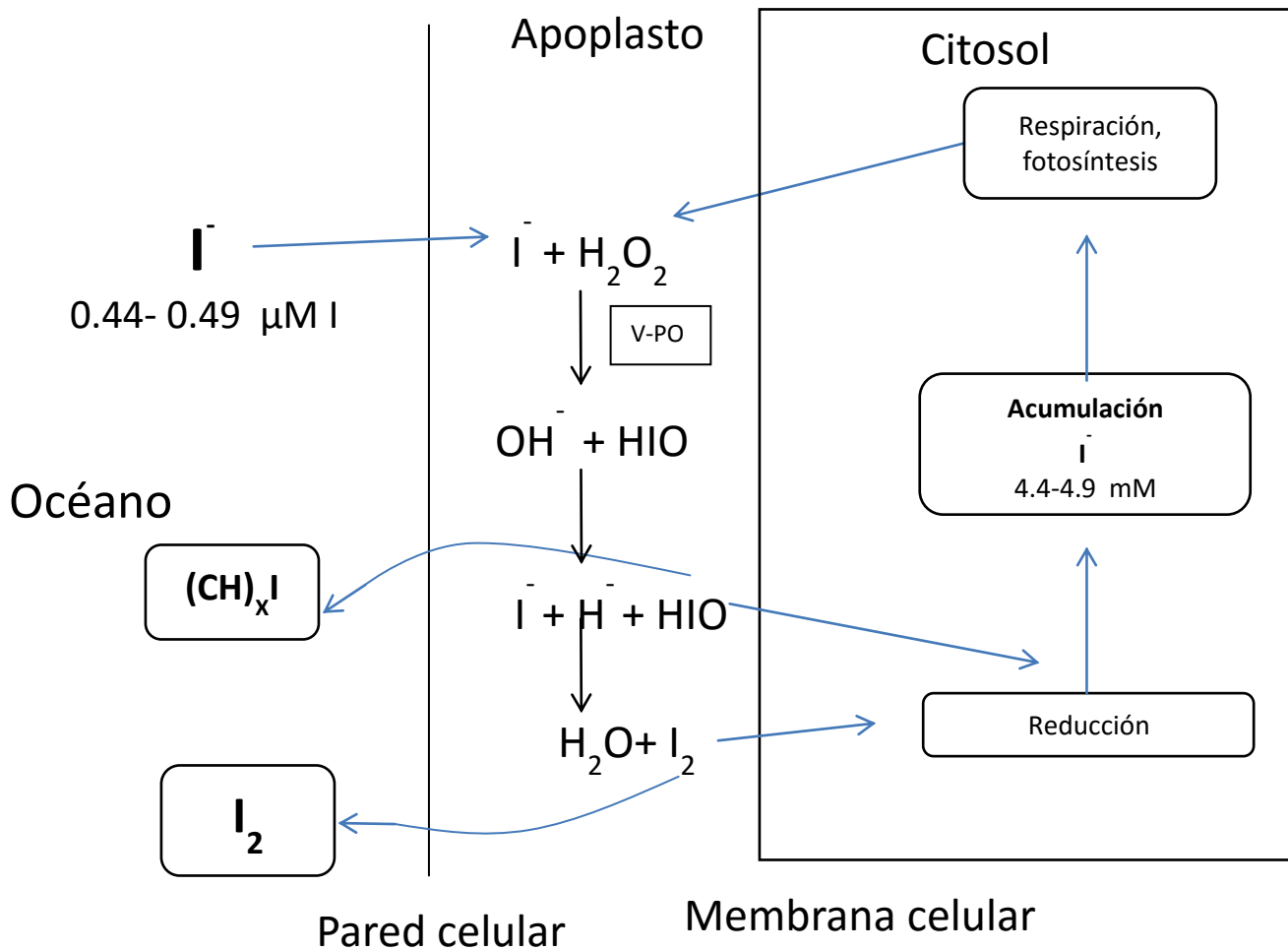


Figura 2. Esquema del mecanismo de absorción y volatilización del yodo por plantas marinas.

(Modificado de Le Blanc *et al.*, 2006).

En las plantas marinas se tiene entonces un papel metabólico bien determinado para el yodo. En el caso de las plantas terrestres (pero sí en las bacterias del suelo) hasta el momento no se han observado estas reacciones de volatilización. A diferencia de las plantas marinas, las plantas terrestres no disponen de un gran almacén de yodo disuelto, sino que las raíces se encuentran en un medio sólido complejo en donde la materia orgánica, las arcillas y los microorganismos modifican la disponibilidad de los elementos minerales, entre ellos el yodo. Se sabe que algunos elementos no pueden ser tan fácilmente captados por las plantas debido a su disponibilidad en el suelo. El yodo es uno de esos elementos, debido a que pareciera que en regiones con suelo oxigénico es fuertemente adsorbido por las partículas edáficas, y la mayor parte de las plantas solo pueden subsistir en suelos con esta característica aerobia (Ashworth, 2009).

Weng y colaboradores (2013) realizaron una serie de experimentos con plantas de repollo y concluyeron que la absorción del yodo a través de la raíz ocurre de forma distinta a lo observado en plantas marinas. En el repollo el transporte de yodo ocurre por medio de transportadores acoplados a bombas de protones así como a través de canales aniónicos y esto mismo se ha observado en otras especies terrestres (White y Broadley, 2009). En cambio, en las plantas marinas parece operar únicamente el mecanismo asociado al bombeo de protones (Weng *et al.*, 2013). La posterior movilización del yodo de la raíz hacia los tallos y hojas ocurre por el xilema (Herret *et al.*, 1962; Mackowiak y Grossl, 1999; Zhu *et al.*, 2003; Kato *et al.*, 2013) aunque al igual que ocurre con otros elementos parece ocurrir una redistribución posterior del yodo vía floema (Landini *et al.*, 2011).

Los procesos de asimilación y transporte del yodo comienzan a dilucidarse y ello promete obtener grandes beneficios en cuanto a la calidad nutricional de los alimentos vegetales. Sin embargo, aún en ausencia de dicho conocimiento una forma práctica de cuantificar la captación de yodo por las plantas es el denominado factor de transferencia (TF) el cual es calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{TF (sin unidades)} = \frac{[\text{Conc. Yodo en planta seca mg K}^{-1}]}{[\text{Conc. Yodo en suelo seco mg K}^{-1}]}$$

La desventaja de dicho factor (TF) es que no indica nada acerca de los factores que lo modifican, sin embargo, si la meta es detectar los tipos de suelo o factores de manejo que elevan la asimilación de yodo o disminuyen su pérdida por volatilización, entonces el TF será muy útil como indicador. Se tiene por ejemplo que el Cl^- tiene un alto TF, debido a su flujo en la planta muestra alta correlación con el flujo hídrico del xilema, se ha calculado un valor $\text{TF}=785$ para el Cl^- en *Lolium perene* (Ashworth y Shaw, 2006). En contraste los valores de TF para yodo suelen ser muy bajos: 0.00034 para pastos (IAEA, 1994), 0.0005-0.02 para cereales en Austria (Shinonaga *et al.*, 2001), 0.024-0.19 para maíz, betabel y calabaza (Sheppard *et al.*, 1993) y 0.01-0.03 para rábanos y lechuga (Kashparov *et al.*, 2005). Sin embargo se ha reportado que es posible incrementar significativamente el TF del yodo, al aumentarse la concentración de este elemento en el suelo. Dai *et al.* (2004) obtuvieron que al aplicar yodo a una concentración de 5 mg kg^{-1} el TF de las partes comestibles de diferentes vegetales aumentó de 0.1 a 10. Los valores se incrementaron en el siguiente orden zanahoria = cebolla < apio < brote de espinaca < hoja de espinaca. Debido a la problemática descrita anteriormente, y no solo a la irregular distribución del yodo en el suelo se han propuesto técnicas de aplicación de yodo al suelo, agua o por aspersión foliar y se ha comprobado la efectividad de estas prácticas para lograr una mejora en la concentración del yodo en las principales plantas de consumo humano

CONCLUSIONES

La salud nutricional de cerca de 2×10^9 personas brinda un enorme incentivo para el desarrollo de nuevas técnicas de biofortificación con yodo para las principales plantas de consumo humano.

El constante de las fuentes de información permite afirmar que la estrategia de fortificación ha permitido un gran avance en el combate contra la deficiencia en el consumo de yodo, sin embargo se requiere ampliar esta estrategia incluyendo ahora la biofortificación de los

cultivos, y para ello es clave la elucidación de los mecanismos concernientes con la absorción, volatilización y acumulación de este elemento por las plantas.

LITERATURA CITADA

- Aceves, C. and Anguiano, B. 2009. Is iodine an antioxidant and antiproliferative agent for the mammary and prostate glands? *In*: Preedy, V.R.; Burrow, G.N.; Watson, R.R. (eds). Handbook of iodine. San Diego, California: Elsevier, 249–257 pp.
- Amachi, S.; Kasahara, M.; Hanada, S.; Kamagata, Y.; Shinoyama, H.; Fujii, T. & Muramatsu, Y. 2003. Microbial participation in iodine volatilization from soils. *Environmental Science & Technology*, 37(17): 3885-3890.
- Andersson, M.; Karumbunathan, V. and Zimmermann, M. 2012. Global iodine status in 2011 and trends over the past decade. *Journal of Nutrition* 142: 744–750.
- Ashworth, D. 2009. Transfer of iodine in the soil-plant-air system: solid-liquid partitioning, migration, plant uptake and volatilization. *Comprehensive handbook of iodine*. Academic press. 107-118.
- Aston, S.R. and Brazier, P.H. 1979. Endemic goitre, the factors controlling iodine deficiency in soils. *Science of Total Environment* 11(1): 99-104.
- Benton Jones, J. 1998. *Plant Nutrition Manual*, CRC Press, UK, 7-10 p.
- Blasco, B.; Ríos, J.J.; Cervilla, L.M.; Sanchez-Rodriguez, E.; Ruiz, J.M. and Romero, L. 2008. Iodine biofortification and antioxidant capacity of lettuce: Potential benefits for cultivation and human health. *Annals of Applied Biology* 152(3): 289–299.
- Borst-Pauwels, G.W.F.H. 1962. An Investigation into the effects of iodide and iodate on plant growth. *Plant and Soil* 16(3): 284-292.
- Bostock, A.C.; Shaw, G. and Bell, J.N. 2003. The volatilization and sorption of ¹²⁹I in coniferous forest, grassland and frozen soils. *Journal of Environmental Radioactivity* 70(1-2): 29-42.

- Burlingame, B. 2013. The role of agriculture in diet: quantity versus quality. Conference Frontiers in Agricultural Sustainability: Studying the Protein Supply Chain to Improve Dietary Quality. The New York Academy of Sciences.
- Charlton, K.E.; Jooste, P.L.; Steyn, K.; Levitt, N.S. and Ghosh, A. 2013. A lowered salt intake does not compromise iodine status in Cape Town, South Africa, where salt iodization is mandatory. *Nutrition* 29(4): 630–634.
- Cui, X.; Sang, Y. and Song, J. 2003. Residual of exogenous iodine in forest soils and its effect on some wild-vegetable plants. *The Journal of applied Ecology* 14(10): 1612-1616.
- Dai, J.L.; Zhu, Y.G.; Zhang, M. and Huang, Y.Z. 2004. Selecting iodine-enriched vegetables and the residual effect of iodate application to soil. *Biological Trace Element Research* 101(3): 265–276.
- De Benoist, B.; McLean, E.; Andersson, M. and Rogers, L. 2008. Iodine deficiency in 2007: global progress since 2003. *Food and Nutrition Bulletin* 29(3): 195–202.
- FAO. 2009. The state of food insecurity in the world, Food and Agriculture of the United Nations, Rome: Electronic Publishing Policy and Support Branch Communication Division. ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i0876e/i0876e_flyer.pdf
- Fraga, C.A. 2005. Relevance, essentiality and toxicity of trace elements in human health Molecular. *Molecular Aspects of Medicine* 26 (4-5): 235–244.
- Fuge, R. 2013. Soil and iodine deficiency. *Essentials of medical geology, part II* Springer Netherlands. pp: 417-432.
- Fuge, R. 1996. Geochemistry of iodine in relation to iodine deficiency disease. *In: Appleton, J.D.; Fuge, R.; McCall, G.J.H. (eds) Environmental geochemistry and health. Geological Society Special Publication, London, 201–211 pp.*
- Fuge, R. and Jhonson, C.C. 1986. The geochemistry of iodine –A review, *Environmental Geochemistry and Health* 8(2): 31-54.

- Gartner, R.; Rank, P. and Ander, B. 2010. The role of iodine and delta-iodolactone in growth and apoptosis of malignant thyroid epithelial cells and breast cancer cells. *Hormones* 9(1): 60–6.
- Gupta, N.; Bajpai, M.S.; Majumdar, R.S and Mishra, P.K. 2015. Response of Iodine on Antioxidant Levels of *Glycine max* L. Grown under Cd Stress. *Advances in Biological Research* 9(1): 40-48.
- Hetzel, B.S. and Stanbury, J.B. 1980. Endemic goiter and endemic cretinism: iodine nutrition in health and disease. Wiley Medical Publication, Wiley, New York, 606 p.
- IAEA. 1994. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Temperate Environments. Technical Report Series No. 364. International Atomic Energy Agency, Vienna, 160 p.
- Jiang, X.M.; Cao, X.Y.; Jiang, J.Y.; Tai, M.; James, D.W. and Rakeman, M.A.; 1998. Dynamics of environmental supplementation of iodine: four years' experience of iodination of irrigation water in Hotien, Xinjiang, China. *Archives of Environmental Health* 52(6), 399-408.
- Juvenal, G.J.; Thomas, L.; Oglio, R.; Pisarev, M.A.; Rossich, L. and Salvarredi, L. 2011. Thyroid: iodine beyond the thyronines. *Current Chemical Biology* 5(3): 163–167.
- Kashparov, V.; Colle, C.; Zvarich, S.; Yoschenko, V.; Levchuc, S. and Lundin, S. 2005. Soil-to-plant halogens transfer studies: 1. Root uptake of radioiodine by plants. *Journal of Environmental Radioactivity* 79(2): 187-204.
- Kato, S.; Wachi, T.; Yoshihira, K.; Nakagawa, T.; Ishikawa, A. and Takagi, D. 2013. Rice (*Oryza sativa* L.) roots have iodate reduction activity in response to iodine. *Frontiers in Plant Sciences* 4: 1-11.
- Keppler, F.; Borchers, R.; Elsner, P.; Fahimi, I.; Pracht, J. and Scholer, H.F. 2003. Formation of volatile iodinated alkanes in soil: results from laboratory studies. *Chemosphere* 52(2): 477–483.

- Kupper, F.C.; Carpentere, L.; McFiggans, G.; Palmere, G.; Waiteh, T. and Bonebergb, E. 2008. Iodide accumulation provides kelp with an inorganic antioxidant impacting atmospheric chemistry. *Proceedings of National Academy of Science* 105(19): 6954-6958.
- La Barre, S.; Potin, P.; Leblanc, C. and Delage, L. 2010. The Halogenated Metabolism of Brown Algae (Phaeophyta), Its Biological Importance and Its Environmental Significance. *Marine Drugs* 8(4): 988-1010.
- Lailou, A.; Mam, B.; Oeurn, S. and Chea, C. 2015. Iodized Salt in Cambodia: Trends from 2008 to 2014. *Nutrients*, 7(6):4189-4198.
- Landini, M.; Gonzali, S. and Perata, P. 2011. Iodine biofortification in tomato. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174(3): 480–486.
- Lazarus, J. H. 2015. The importance of iodine in public health. *Environmental geochemistry and health*, 1-14.
- Lawson, P.G.; Daum, D.; Czauderna, R.; Meuser, H. and Härtling, J.W. 2015. Soil versus foliar iodine fertilization as a biofortification strategy for field-grown vegetables. *Frontiers in Plant Science*, 6:450.
- Leyva, R.; Sánchez-Rodríguez, S.; Ríos, J.J.; Rubio-Wilhelmi, M.; Romero, L.; Ruiz, J.M. and Blasco, B. 2011. Beneficial effects of exogenous iodine in lettuce plants subjected to salinity stress. *Plant Science*, 181:195–202.
- Mottiar, Y. 2013. Iodine biofortification through plant biotechnology. *Nutrition* 29(11-12): 1431-1433.
- Nestel, P.; Bouis, H.; Meenakshi, J.V. and Pfeiffer, W. 2006. Biofortification of Staple Food Crops. *Journal of Nutrition* 136(4): 1064-1067.
- Núñez-Anita, R.E.; Cajero-Juárez, M. and Aceves, C. 2011. Peroxisome proliferator activated receptors. Role of isoform gamma in the antineoplastic effect of iodine in mammary cancer. *Current Cancer Drug Target* 11(7): 775–786.
- Roti, E. and Uberti, E. 2011. Iodine Excess and Hyperthyroidism. *Thyroid* 11(5): 493-500.

- Seki, R.; Takahashi, T. and Ikeda, N. 1984. Adsorption behavior of radioactive iodide and iodate in soil. *Radioisotopes* 33(2): 51-54.
- Sheppard, S.C.; Evenden, W.G. and Amiro, D. 1993. Investigation of the soil-to-plant pathway for I, Br, Cl and F. *Journal of Environment Radioactivity* 21(1): 9-32.
- Shinonaga, T.; Gerzabek, M.H.; Strebl, F. and Muramatsu, Y. 2001. Transfer of iodine from soil to cereal grains in agricultural areas of Austria. *Science of Total Environment*. 267(1-3): 33-40.
- Smolen, S. and Sady, W. 2012. 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.). *Scientia Horticulturae* 142: 176–183.
- Stein, A. 2009. Global impacts of human mineral malnutrition. *Plant Soil* 335(1-2): 133-154.
- Tonacchera, M.; Dimida, A.; De Servi, M.; Frigeri, M.; Ferrarini, E. and De Marco, G. 2013. Iodine Fortification of Vegetables Improves Human Iodine Nutrition: *In Vivo* Evidence for a New Model of iodine Prophylaxis. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 98(4):694-697.
- Torremante, P.E. and Rosner, H. 2011. Antiproliferative effects of molecular iodine in cancers. *Current Chemical Biology* 5(13): 168–176.
- Truesdale, V.W.; Luther, G.W. and Canosa-Mas, C. 1995. Molecular iodine reduction in seawater: an improved rate equation considering organic compounds. *Marine Chemistry* 48(2): 143-150.
- Vir, S.C. 2002. Current status of iodine deficiency disorders (IDD) and strategy for its control in India. *Indian Journal of Pediatrics*. 69(7): 589-596.
- Voogt, W.; Holwerda, H.T. and Khodabaks, R. 2010. Biofortification of lettuce (*Lactuca sativa* L.) with iodine: the effect of iodine form and concentration on growth, development and

- iodine uptake of lettuce grown in water culture. *Journal of Science Food and Agriculture* 90(5): 906-913.
- Weng, H.X.; Hong, C.L.; Yan, A.L.; Pan, L.H.; Qin, Y.C. and Bao, L.T. 2008. Mechanism of Iodine Uptake by Cabbage: Effects of Iodine Species and Where It is Stored. *Biology of Trace Elements Research* 125(1): 59–71.
- Weng, H. X.; Liu, H. P.; Li, D. W.; Ye, M.; Pan, L. and Xia, T. H. 2014. An innovative approach for iodine supplementation using iodine-rich phytogetic food. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(4): 815-828.
- Weng, H.X.; Yan, A.I.; Hong, C.L.; Xie, L.L.; Yong, W.B. and Qin, Y.C. 2008b. Increment of Iodine Content in Vegetable Plants by Applying Iodized Fertilizer and the Residual Characteristics of Iodine in Soil. *Biology of Trace Element Research* 123(1-3): 218-228.
- Weng, H.X.; Yan, A.I.; Hong, C.L.; Xie, L.L.; Qin, Y.C. and Cheng, C.H. 2008c. Uptake of Different Species of Iodine by Water Spinach and Its Effect to Growth. *Biology of Trace Elements Research* 124(2): 184–194.
- Weng, H.X.; Weng, J.K.; Yong, W.B.; Sun, X.W. and Zhong, H. 2003. Capacity and degree of iodine absorbed and enriched by vegetable from soil. *Journal of Environmental Sciences* 15(1) 107–111.
- Weng, H.; Hong, C.; Yan, A. and Ji, Z. 2013. Biogeochemical transport of iodine and its quantitative model. *Science China Earth Science* 56(9): 1599-1606.
- White, P.J. and Broadley, M. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diet- Iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist* 182(1): 49-84.
- Winter, J.M. and Moore, B.S. 2009. Exploring the chemistry and biology of Vanadium-dependent Haloperoxidases. *Journal of Biological Chemistry* 284(28): 18577-18581.
- Zanirato, V. and Mayerle, M. 2009. Method for enriching crops with iodine, and crops thus obtained. International Patent PCT/EP2009/050142.

- Zhao, J.; Wang, P.; Shang, L.; Kevin, M.; Sullivan, K.M.; Van der Haar, F. and Maberly, G. 2000. Endemic goiter associated with high iodine intake. *American Journal of Public Health* 90(10): 1633–635.
- Zhu, Y.G.; Huang, Y.Z.; Hu, Y. and Liu, Y.X. 2003. Iodine uptake by spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants grown in solution culture: effects of iodine species and solution concentrations. *Environment International* 29(1): 33-37.
- Zimmermann, M.B. 2009. Iodine deficiency. *Endocrine Reviews* 30(4): 376–408.