

# Bioestimulación láser en semillas y plantas

## Laser biostimulation in seeds and plants

CLAUDIA HERNÁNDEZ-AGUILAR<sup>1\*</sup>, ARTURO DOMÍNGUEZ-PACHECO<sup>1</sup>, ALFREDO CRUZ-OREA<sup>2</sup>, ANNE PODLEŚNA<sup>3</sup>, RUMEN IVANOV<sup>4</sup>, AQUILES CARBALLO CARBALLO<sup>5</sup>, MARÍA CRISTINA PÉREZ REYES<sup>1,6</sup>, GABRIELA SÁNCHEZ HERNÁNDEZ<sup>1,6</sup>, ROSALBA ZEPEDA BAUTISTA<sup>1</sup> & JOSÉ LUIS LÓPEZ-BONILLA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SEPI-ESIME, Instituto Politécnico Nacional (IPN), Zacatenco, Col. Lindavista. 07738, Cd. de México, México.

<sup>2</sup>Departamento de Física, CINVESTAV – IPN. A. P. 14-740. 07360, Cd. de México, México.

<sup>3</sup>Institute of Soil Science and Plant Cultivation – State Research Institute, Czartoryskich 8, 24-100 Puławy, Poland.

<sup>4</sup>Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas, A.P. 580, Zacatecas, México.

<sup>5</sup>Colegio de postgraduados. Programa de Recursos Genéticos y Productividad, Producción de semillas, Montecillo, Texcoco, km 36.5 Carr. México - Texcoco. C. P. 56230.

<sup>6</sup>Unidad de Investigación en Granos y Semillas FESC, Universidad Nacional Autónoma de México, Jorge Jiménez Cantú Av. S/N, Cuautitlán Izcalli, Edo. México, CP. 54740. México.

\*clauhaj@yahoo.com

### RESUMEN

Diversos láseres han demostrado ser potencialmente útiles a determinados parámetros de irradiación y podrían beneficiar el establecimiento de siembra en condiciones adversas por radiación UV-B, sequía, frío, salinidad, contaminación por cadmio, etc. Esta revisión de literatura científica exhibe las aplicaciones posibles de los láseres en los últimos años, como tratamiento de semillas y plantas, destacando el uso de los láseres de He-Ne, Ar, Neodimio-YAG, CO<sub>2</sub> y los diodos láser. Es evidente que las aplicaciones de láseres a parámetros de irradiación específicos en semillas y plantas han adquirido cada vez mayor importancia debido a la necesidad de incrementar la producción de alimentos a nivel global mediante métodos que protejan el medio ambiente y contribuyan a combatir los efectos del cambio climático y a la conservación de la biodiversidad, mejorando la calidad de vida humana y animal. De esta manera, en este Año Internacional de “la Luz y las tecnologías basadas en la luz”, fue importante tomar conciencia del posible uso potencial de la luz láser en la agricultura, ya que podría coadyuvar a un desarrollo sostenible y ofrecer soluciones a problemáticas diversas. Los avances encontrados por diversos científicos lo evidencian y en los próximos años podría tener un auge en su aplicación en la agricultura como un elemento “bioestimulador” de semillas, plántulas y plantas.

**PALABRAS CLAVE:** Láser, diodos, agricultura, semillas, plantas, bioestimulación.

### ABSTRACT

Different lasers have proven to be potentially useful to certain parameters of radiation and could benefit the establishment of planting in adverse conditions by UV-B radiation, drought, cold, salinity, pollution by cadmium, etc. This literature review shows the possible applications of lasers in recent years, as seed treatment and plants, emphasizing the use of He-Ne lasers, Ar, neodymium-YAG, CO<sub>2</sub> and laser diodes. It is clear that applications of lasers to parameters specific irradiation of seeds and plants have become increasingly important because of the need to increase food production globally by methods that protect the environment and help to combat the effects of climate change and biodiversity conservation, improving the quality of human and animal life. Thus, in the International Year of “Light and light-based technologies,” it was important to become aware of possible potential use of laser light in agriculture because it could contribute to sustainable development and offering solutions to problems diverse. Advances that have found various scientists in the world provide evidence, thus, in the coming years could have a boom in its application in agriculture as an element “biostimulator” of seeds, seedlings and plants.

**KEYWORDS:** Laser, diodes agriculture, seeds, plants, biostimulation.

## INTRODUCCIÓN

Los bioefectos debidos a la irradiación láser de baja intensidad (ILBI) en semillas presembrada y en plántulas o plantas durante su desarrollo (*i.e.*, aplicación de energía fotónica en longitudes de onda y dosis específicas que producen un macro o micro efecto) han sido confirmados por numerosos estudios usando semillas de diversos cultivos (Paleg & Aspinall 1970, Govil *et al.* 1983, Koper *et al.* 1999, Katanska *et al.* 2003, Hernández-Aguilar *et al.* 2006, Drozd & Szajsner 2007, Podlešny 2007, Muszyński & Gladyszewska 2008, Aladjadjiyan & Kakanakova 2008, Osman *et al.* 2009, Aladjadjiyan 2012, Hoseini *et al.* 2013, El-Kereti *et al.* 2013, Jia & Duan 2013, Dobrowolski *et al.* 1997, 2012, Śliwka 2014, Srećković *et al.* 2014, Kouchebagh *et al.* 2014, Szajsner & Bąbelewski 2014, Gao *et al.* 2014). A partir de la llegada de los láseres en los años 60's (Nasim & Jamil 2014), se inició su aplicación en sistemas biológicos (Bessis *et al.* 1962), incursionando al sector agrícola como elemento bioestimulador (BE) de plantas y semillas con el láser de rubí (Wilde *et al.* 1969), y posterior a su descubrimiento también han sido aplicados los láseres de He-Ne (Helio-Neón), Ar (Argón), Neodimio-YAG (Nd-YAG), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y diodos (en distintas longitudes de onda –  $\lambda$ ), (Paleg & Aspinall 1977, Govil *et al.* 1985, 1991, Koper *et al.* 1996, Rong *et al.* 2001, Chen & Wang 2004, Chen & Sun 2006, Qiu *et al.* 2008a, 2008b, Chen 2008, 2009, Aladjadjiyan 2007a, 2007b, Śliwka & Jakubiak 2009, Chen *et al.* 2010, Hernández-Aguilar *et al.* 2005, 2006, 2007a, 2007b, 2010, 2011, Behzadi *et al.* 2012), lo cual permite conjeturar el uso de la tecnología láser para tratamiento presembrada o durante algunas de las etapas fenológicas de los cultivos.

Sin duda alguna el siglo XXI necesita desarrollar tecnologías que aumenten la producción mundial de alimentos ya que uno de los principales desafíos de nuestro tiempo es alimentar a una creciente población mundial (FAO 2009a, 2009b, Foley 2011, Foresight 2011, Pittelkow *et al.* 2015), proyectada para el año 2050 de dos a tres mil millones de personas más, esto significa que según las previsiones la población mundial aumentará a 9.000 millones (FAO 2011), con un incremento simultáneo duplicado de alimentos, acumulado el problema de hambre que se agudizará, al mismo tiempo la necesidad de reducción de daños al medio ambiente (Foley 2011). Todo esto bajo un contexto actual y futuro de cambio climático, zonas amenazadas con elevadas temperaturas (Trnka *et al.* 2014) y pronósticos de años extremadamente desfavorables de condiciones climáticas futuras (Semenov & Shewry 2011, IPCC 2012). De esta manera la tecnología láser, entre otras muchas, podría ser una opción conveniente para incorporarse en los sistemas de producción agrícola. Por lo que se planteó como objetivo realizar una revisión de literatura de los avances recientes sobre los bioefectos de ILBI en semillas, plántulas y plantas,

describiendo su uso potencial como tratamiento alternativo presembrada o durante distintas fases de desarrollo y poder contribuir en la mejora de la calidad y cantidad de producción de alimentos, lo cual es un reto de la humanidad, siendo la producción de cultivos fuente de materias primas y energía, un elemento clave del desarrollo de las civilizaciones (Skowrońska & Filipek 2014).

### LÁSER DE HE-NE

Aunque el descubrimiento del láser de He-Ne ocurrió en 1961, fue algunos años después cuando se inicia su aplicación en plántulas (Paleg & Aspinall 1970), y desde entonces la tecnología láser ha evolucionado y se ha aplicado para llevar a cabo procesos de bioestimulación de semillas y plantas. Siendo este láser de He-Ne, el más aplicado como BE de semillas y/o plantas, desde su incursión en la agricultura hasta nuestros días (Hernández *et al.* 2010, Vasilevski 2003, Aladjadjiyan 2012). Los reportes científicos señalan bioestimulación positiva, negativa y nula (Jianjun *et al.* 2011a, 2011b, Jiao *et al.* 2011, Wei & Weikai 2009, Xiao *et al.* 2012), y no sobrepasar ciertos niveles de irradiación, porque pudiera ocurrir algún proceso mutagénico, a largos tiempos de exposición y altas intensidades de irradiación siendo estos cambios menores en comparación con los provocados por radiaciones gamma (Ritambhara & Kumar 2013, Kumar & Srivastava 2010). De esta manera es de interés encontrar los parámetros de irradiación láser adecuados para producir bioefectos favorables y al ser aplicados en el sector agrícola se pudiera, entre otros efectos, aumentar el rendimiento de producto, tallos y semillas, reducir el periodo vegetativo, mejorar la calidad de cosecha, producir plantas vigorosas, mejorar la evolución fotosintética de las plantas, romper la latencia de semilla, estimular la germinación, recuperar la tierra y proteger el ambiente contra mohos toxicogénicos y bacterias (Koper 1994, Dobrowolski *et al.* 1997, Kumar *et al.* 2010, Duan & Yang 2010, Muszyński & Gladyszewska 2008, Geweely *et al.* 2006, Jianjun *et al.*, 2011b, Sen-He *et al.* 2012, Zhang *et al.* 2011). Los reportes científicos señalan incremento a la resistencia, ante condiciones adversas de distinto tipo de estrés como radiación UV-B, sequía, frío, salinidad, existencia de cadmio, de plantas provenientes de semilla o plántulas tratadas con láser de He-Ne (Qiu *et al.* 2007, Li *et al.* 2013, Duan *et al.* 2010, Kang *et al.* 2008, Ai-Zhen *et al.* 2012, Shan & Han 2009, Zhang *et al.* 2008, Zhang & Rong 2011, Ying & Chen 2010) así como mejora de la calidad sanitaria de las semillas (Ouf & Abdel-Hady 1999, Wilczek *et al.* 2004, 2005a, 2005b, Muszyński & Gladyszewska 2008, Rassam *et al.* 2012, 2013, Pérez *et al.*, 2015), existiendo aun la necesidad de explorar su uso para descontaminar el suelo y el agua que se emplea en los sistemas agrícolas, ya que hay evidencia del posible uso del láser para tratamientos de microorganismos en procesos de biorremediación (Dobrowolski 2010, Śliwka & Jakubiak 2010a, 2010b, El-Naggar *et al.* 2012, Dobrowolski *et*

al. 2012a). De esta manera la tecnología láser podría ser un auxiliar en la seguridad alimentaria, impactando en la calidad de vida de las personas.

La Bioestimulación empleando laser de He-Ne (632.8nm) y diodos láser (650, 660 nm) se ha aplicado para la mejora de calidad fisiológica de ciertos cultivos, entre otros, en cereales: *Zea mays* L., *Triticum* (Toth *et al.* 1993, Joshi *et al.* 2012); oleaginosas: *Carthamus tinctorius* L., *Helianthus annuus*, *Brassica napus* (Kumar & Srivastava 2010, Perveen *et al.* 2010, Ashrafijou *et al.* 2010); leguminosas: *Medicago sativa*, *Vicia faba*, *Lathyrus sativus* L. (Wilczek *et al.* 2005a, Qi *et al.* 2002, Truchliński *et al.* 2002); hortalizas: *Raphanus sativus* L., *Solanum lycopersicum* L. (Muszyński & Gladyszewska 2008, Álvarez *et al.* 2011a); arbustos: *Acacia farnesiana* L., *Ricinus communis* L. (Soliman & Harith 2009) y otros: *Balanites aegyptiaca*, *Celosia argentea*, *Beta vulgaris* L. (Metwally *et al.* 2013, Zhang *et al.* 2008). De acuerdo a la literatura científica revisada acerca de los más recientes avances de la aplicación del láser en semillas y plántulas, el cultivo más estudiado ha sido el trigo (*Triticum aestivum* L.).

Semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.) fueron sembradas y un día después de iniciada la germinación, tratamientos de irradiación diarios fueron aplicados con lámparas UV-B (280-315 nm) en condiciones de estrés, aplicando por otro lado láser de He-Ne, observando Chen & Han (2015) que las plántulas expuestas a la irradiación de luz láser alivia los efectos dañinos de la radiación UV-B por el cambio de las características de filamentos de actina. Es decir, la actina participó en el proceso de reparación producido por la luz láser de Intensidad (I) de 5.43 mW/mm<sup>2</sup> y tiempo de exposición (t) de dos minutos. Otros estudios en trigo radiando semilla y plántula reportan alivio parcial en las lesiones producidas por la radiación UV-B, así como la mejora de la germinación y la tasa de crecimiento de brotes, el desarrollo de la raíz, contenido de clorofila y la expresión de peroxidasa, la altura de las plántulas y la biomasa (Yang *et al.* 2012). Cambios morfológicos en plantas de trigo procedentes de semilla tratada con luz láser de He-Ne cuya potencia (P) fue 50 mW son reportados por Srećković *et al.* (2014), observando plantas más altas y más gruesas que las plantas procedentes de semilla sin irradiación (control o testigo). Abu Elsaoud & Tuleukhanov (2013a) observaron después de siete días que la semilla pretratada con láser de He-Ne (I= 5mW/mm<sup>2</sup>) incrementa significativamente el porcentaje de germinación de cuatro variedades de trigo (*Triticum aestivum* L. cv. aksay, *Triticum aestivum* L. cv. kas-10, *Triticum aestivum* L. cv. eret-350egypt y *Triticum aestivum* L. cv. sakha-168 ) al ser expuestas las semillas a luz láser durante 1, 3, 60 y 600 s; sin embargo, a 10, 180, 1200 y 1800 s se redujo la germinación. La peroxidación lipídica incrementó significativamente en las cuatro variedades de trigo y superóxido dismutasa (SOD) fue decrecida después de la irradiación de semilla presiembra con láser de He-Ne

presiembra con respecto a la actividad enzimática de SOD en tejidos de las plantas control; esta tendencia de resultados se repitió en siembra de semilla en hidrogeles (Abu Elsaoud & Tuleukhanov 2013b). Al irradiar semillas de trigo, con láser de He-Ne, en condiciones seca y humedecida, Jevtić *et al.* (2015) encontraron que las plantas procedentes de semilla irradiada son más altas y producen una mayor cosecha al compararla con las semillas no irradiadas (control), siendo las semillas humedecidas previas al tratamiento láser más susceptibles al efecto láser al compararlas con la semilla seca. Joshi *et al.* (2012) establecieron un ensayo experimental empleando semilla seca y humedecida por una hora en agua destilada, encontrando que la irradiación láser de He-Ne mejora la captación, así como la translocación de iones Zn, presentando mejor captación las semillas humedecidas. En el caso de las semillas no humedecidas, las que tuvieron mejor captación de Zn fueron las semillas tratadas a dos min de irradiación presiembra.

Por otro lado, semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) han sido estudiadas aplicando laser de He-Ne, de 25 mW bajo los tiempos de exposición de 5, 10, 20, 30 y 60 s, encontrando Álvarez *et al.* (2011a) que no hubo cambios significativos en el porcentaje de germinación, aunque sí hubo una tendencia a incrementar hasta los 30 s y posteriormente a decrecer. Con relación a la supervivencia de las plántulas, no se constataron diferencias significativas. La altura de las plantas mostró valores de estimulación significativos con respecto al control (muestras sin irradiar). Muthusamy *et al.* (2012) aplicaron en semillas de berenjena (*Solanum melongena* L.), uniformizadas y humedecidas durante tres horas, tratamiento de luz láser de baja intensidad de He-Ne a distintas dosis de irradiación (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 J/cm<sup>2</sup>) observando cambios significativos en germinación de semillas, donde los mejores resultados fueron para las dosis de radiación de 25 y 30 mJ/cm<sup>2</sup>. La exposición de la semilla a la dosis de 25 mW/cm<sup>2</sup> incrementó las longitudes de brotes y raíces, peso fresco de brotes y raíz, así como el número de hojas de plántulas, esto al ser comparados con respecto a las muestras control (no irradiadas). A la dosis de 25 mJ/cm<sup>2</sup> hubo incremento estadísticamente significativo en el nivel de clorofila y carotenoides; con respecto a las antocianinas no reportaron los autores cambios significativos cuando compararon las muestras irradiadas con respecto a las muestras control (no irradiadas). La respuesta bioquímica mejoró, evidenciado a través de las actividades mejoradas de amilasas y proteasas. Mientras que en semilla con alto nivel de germinación (98%), al aplicar láser de He-Ne como tratamiento con una intensidad I= 2.5 mW/cm<sup>2</sup> a distintos tiempos de exposición no se manifestaron efectos en porcentaje de germinación, pero se incrementaron significativamente los indicadores del crecimiento (diámetro del tallo, longitud de raíz, altura de plantas) con tiempos de exposición de 5, 10 y 20 s, alcanzando los mayores valores de estimulación en altura de

las plantas a un  $t = 20$  s (Álvarez *et al.* 2011b). Con similares parámetros de bioestimulación láser reportaron Álvarez *et al.* (2013) incremento del número de flores, frutos, racimos, diámetro medio polar, diámetro medio ecuatorial, peso de los frutos y rendimiento por plantas.

El láser de He-Ne también ha demostrado ser un método útil para mejorar la calidad sanitaria de semilla, como los estudios reportados por Ouf & Abdel-Hady (1999), quienes aplicaron un tratamiento con láser de He-Ne, con potencia de 7.3 mW y durante 1, 3, 6 y 10 min, a semilla de soya (*Glycine max* L.) teñida y colocada en un contenedor que rotaba al momento de la irradiación, observando a los 3 min, una reducción en el número de hongos transmitidos por la semilla y esta reducción se hizo más pronunciada a medida que el tiempo de irradiación se incrementó. El tratamiento previo de las semillas con azul de metileno, rojo de metilo y carmín aumentó el efecto fungicida en los hongos *Rhizoctonia solani*, *Alternaria tenuissima*, *Cercospora kikuchii* y *Colletotrichum truncatum*, los cuales fueron completamente eliminados cuando las semillas se irradiaron durante 10 min. La germinación se estimuló con 1 min de irradiación, en lo que respecta al contenido de carotenoides, en las hojas de la soya, este fue incrementado al aumentar la dosis láser. Al irradiar meristemas apicales de plántulas medicinales de *Isatis indigotica* con UV-B  $8 \text{ hd}^{-1}$  por 8 días y exponer a la radiación láser de He-Ne (633nm,  $5.23 \text{ mW/mm}^2$ ,  $d = 1.5 \text{ mm}$ ) durante 5 min al día, sin radiación de luz ambiental, Chen (2009) observó que la radiación láser tiene una función activa en la reparación de lesiones por la radiación UV-B inducida en las plántulas.

#### DIODOS LÁSER

El avance en la tecnología de los láseres de diodo ha traído una notable mejora en las características espectrales, la eficiencia y la vida útil funcional de estos dispositivos (Nasim & Jamil 2013), además ha permitido disminuir sus costos. De esta manera diversos investigadores buscan demostrar su utilidad como elementos bioestimuladores (BEs), al igual que lo ha sido el láser de He-Ne, encontrando, de acuerdo a la revisión realizada de los últimos años, que los diodos láser empleados como BEs se encuentran en el rango del color azul, verde, rojo e infrarrojo (Tabla I).

Láseres de diodos con longitudes de onda de 680, 980 y 532 nm y potencias de 110, 250 y 75 mW, respectivamente, fueron empleados por Ferdosizadeh *et al.* (2013) para irradiar semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.) homogeneizadas y esterilizadas, establecidas en condiciones salinas previamente a la irradiación, encontrando que los efectos de las distintas longitudes de onda de los láseres empleados tuvieron diferencias estadísticas significativas en germinación y rendimiento. La mejor eficiencia fue obtenida con el láser de 532 nm, a dos regímenes de irradiación, siendo los efectos de bioestimulación más evidentes a mayor concentración salina (mayor condición

de estrés de la semilla), presentándose este tratamiento láser como una opción de bioestimulación para áreas de siembra salinas. Por otro lado, empleando un láser diodo de 980 nm con densidades de potencia de 15, 30 y  $60 \text{ mW/cm}^2$  como tratamiento presiembra en semillas de trigo, Mitchenko & Hernández (2010) encontraron que la bioestimulación láser incrementó e inhibió la longitud del coleóptilo y el sistema radicular; a los  $15 \text{ mW/cm}^2$  causó una disminución de la longitud del coleóptilo a partir de los 30 s. A  $60 \text{ mW/cm}^2$  de exposición también produjo una disminución a los 15 s y en 30 y 60 s tendió a aumentar, para después volver a disminuir en 120 y 240 s; confirmando, como otros autores, resultados positivos y negativos mediante la bioestimulación láser.

Semillas de leguminosa como el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) de distintos ciclos productivos tratadas presiembra con láser de 408 nm y potencia de 150 mW expuestas a 18 regímenes de irradiación alternando 10 min de irradiación y 30 min sin irradiación durante 24 h, produjeron bioestimulación positiva y negativa, donde las semillas con mayor longitud de penetración óptica ( $I_p = 1/\beta$ , donde  $\beta$  = coeficiente de absorción óptico) obtuvieron bioestimulación positiva en % de germinación, incrementando su valor con respecto al control del 47% (Sánchez *et al.* 2015).

Con diodos láser, además de semilla tratada presiembra, también se han tratado esquejes y plantas, como los esquejes de planta acuática de *Lemna minor* que fueron tratados y cultivados en hidroponía mediante tratamientos de luz emitida por diodos láser de 660 y 514 nm, encontrando Rimal *et al.* (2014) que el tamaño y número de raíces fueron diferentes significativamente con respecto al control. Los tratamientos de tres regímenes de irradiación de los diodos láser, de 660 y 514 nm con 10 y 3 s de exposición respectivamente, con pausas entre regímenes de 3 s, tuvieron los mejores resultados en términos de número de raíces y brotes después de 7 días. El mejor crecimiento de raíces y brotes fue en el tratamiento con diodo láser de 514 nm después de tres semanas del cultivo enraizado en suelos contaminados industrialmente. En esquejes de sauce (*Salix viminalis*), variedad resistente a enfermedades y tolerante a insectos, radiados con diodo láser rojo (670 nm), bajo tres regímenes de irradiación de 30 s, Jakubiak & Gdowska (2013) encontraron que se acelera el crecimiento y se tiene un incremento de biomasa.

En plantas de *Lemna minor* irradiadas con diodo láser de 660 nm, 20 mW de potencia bajo tres regímenes de irradiación, Dobrowolski *et al.* (2012b) observó un incremento en la producción de biomasa y presentó mejor adaptación, viabilidad y resistencia a condiciones desfavorables ambientales de alta o baja temperatura, y deficiencia de agua. Śliwka (2014) irradló plantas de *Lemna minor* L. estableciéndolos en estanques con aguas residuales y en cajas de Petri sobre tierra contaminada con cadmio, mostrando que la selección apropiada de los parámetros de estimulación permite obtener un aumento del crecimiento

de la biomasa, cambios en el contenido de elementos de la biomasa e incrementa la resistencia de las plantas ante condiciones ambientales desfavorables.

Los diodos láser al igual que el láser de He-Ne, también han mostrado su efecto potencial como elementos fungicidas al combinarse con fotosensibilizadores. Semillas de maíz teñidas con azul metileno fueron tratadas por Hernández-Aguilar *et al.* (2011) usando un diodo láser, longitud de onda de 655 nm con 27.4 mW de potencia y 5 min de exposición, en estas semillas disminuyó significativamente la cantidad de semilla infectada con hongo *Fusarium* spp. La irradiación láser podría ser una alternativa para controlar enfermedades en semillas de maíz (*Zea mays* L.), y de esta manera mejorar la calidad sanitaria de la semilla y posiblemente del producto final obtenido de las plantas provenientes de semilla tratada con diodo láser. Así mismo, Pérez *et al.* (2015) en semilla de cebada (*Hordeum vulgare* L.) teñida (con azul metileno) y no teñida, tratada pre-siembra con láser rojo durante tiempos de exposición de 60, 120, 240 y 480 s, encontraron que a todos los tiempos de exposición hubo una mejora de la calidad sanitaria de la semilla, ya que causó una reducción de la cantidad de semilla con micobiota asociada naturalmente a la semilla en todos los tiempos de radiación aplicados, en ambas condiciones de semilla teñida y no teñida. Se encontró una mayor reducción de semilla infectada a 120 s de exposición a la luz láser en la semilla teñida, aunque la reducción inicia desde los 60 s aplicados, encontrándose mayor reducción a ese tiempo en la semilla coloreada que en la semilla sin colorear.

#### LÁSER Ar, Nd-YAG Y CO<sub>2</sub>

En los últimos años se ha disminuido el uso de los láseres de Argón, Nd-YAG y CO<sub>2</sub>, aunque aún hay reportes que especifican su utilidad para el tratamiento de semillas y plantas en recientes años. Como el caso de plantas acuáticas de (*Lemna minor* L.) que fueron irradiadas con láser de Ar de 514 nm y 20 mW de potencia donde Dobrowolski *et al.* (2012b) encontraron la disminución o desaparición de los síntomas de clorosis y posterior defoliación en el grupo de plantas irradiadas en tres regímenes de irradiación por 3 s.

Un láser de Nd-YAG, longitud de onda de 532 nm y 25 mW de potencia fue aplicado en semillas de soya (*Glycine max*) como tratamiento BE, presentando temprana emergencia durante la germinación al compararlas con el control. Un crecimiento potencial fue presentado a las 4 semanas de siembra en los tiempos de irradiación de 30 y 120 s. A los tres meses de siembra las plantas tuvieron hojas de tamaño mayor y de color verde más intenso que las de control. El crecimiento vegetativo de plántulas de soya fue significativamente mayor después del tratamiento con láser Nd-YAG, donde la magnitud de la estimulación alcanzada de crecimiento de plántulas estuvo en función del tiempo de exposición del tratamiento láser (Khalifa & Ghandoor

2011). En semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.) también se ha empleado láser de CO<sub>2</sub> como tratamiento de semilla, el cual ha sido aplicado en semillas establecidas bajo la condición de estrés por frío, encontrando una mejora de tolerancia de las plántulas provenientes de semilla tratada con el láser por un tiempo de 300 s (Chen *et al.* 2010).

Como efecto esterilizante también ha sido reportado mediante el uso de láser de Nd-YAG de 532 nm, el cual se empleó para irradiar semillas de trigo (*Triticum durum*) en condiciones secas y húmedas, las cuales se mantuvieron en la oscuridad durante tres semanas, observando Rassam *et al.* (2012) que el tratamiento láser podría emplearse para controlar la infección de hongos en la semilla de trigo y mejorar su crecimiento y desarrollo. La irradiación podría ser un método alternativo para controlar la infección de semillas por hongos. Otros estudios han mostrado que la combinación de láseres de Nd-YAG y de diodos podrían tener efectos fungicidas en alimentos, por ejemplo, luz proveniente de láseres de 532 nm (Nd-YAG) y 660 nm (diodo láser) con potencias de 100 y 120 mW, respectivamente, fueron empleados con el propósito de erradicar hongos *Aspergillus flavus* inoculados en pistaches establecidos en condiciones secas y húmedas.

Las muestras recibieron 0.5 J/cm<sup>2</sup> durante 7 días, de cada uno de los láseres y en combinación de ellos, demostrando Saghafi *et al.* (2010) que la combinación de ambos láseres erradican los hongos de los pistaches. El desarrollo de nuevos enfoques de irradiación que puedan eliminar hongos dañinos de las semillas, cereales, granos y alimentos en general son de utilidad sobre todo como en el caso del método de irradiación láser, el cual a diferencia de métodos como el empleo de radiación gamma o UV, la luz láser no provoca cambios de textura, contenido nutricional y cambios en la apariencia física a los niveles de baja intensidad y cortos tiempos de exposición. De esta manera, encontrar los parámetros de irradiación láser adecuados para eliminar microorganismos de semillas y alimentos podría beneficiar la salud de la población y la prevención de enfermedades en nuestros tiempos.

En la Figura 1 es posible observar los diferentes intervalos de tiempo que han sido empleados por los distintos láseres en los últimos años, donde se observa que los láseres de diodo intensifican su uso principalmente en la longitud de onda del color rojo, aplicando tiempos de exposición que van de 3-720 s, de acuerdo a la literatura revisada. Aunque el láser que se ha empleado a menores tiempos de exposición ha sido el láser de He-Ne cuyos intervalos de tiempo de exposición han sido desde 0,1 hasta 5 400 s. Otros intervalos de tiempo de exposición aplicados por los láseres de diodos a 408, 473, 512, 532, 900 y 980 nm de longitud de onda han sido 600-10 800, 3-30, 10-30, 60-720, 600, 10-1 000 y 15-240 s.

## MECANISMOS DE BIOESTIMULACIÓN

La sinergia de eventos simultáneos que suceden cuando la semilla es irradiada por la luz láser hace que los mecanismos de bioestimulación aún no sean lo suficientemente claros (Zhang *et al.* 2011). En general, hay diversas hipótesis concernientes a los posibles mecanismos de bioestimulación láser como la acción biológica de la ILBI, la cual sostiene que se debe a las sustancias contenidas en los objetos biológicos con bandas de absorción de luz, de tal manera que la excitación selectiva de cromóforos conducen a reacciones bioquímicas (Popov *et al.* 2007). Un cromóforo es una molécula (o parte de una molécula), la cual tiene la capacidad de absorber determinada longitud de onda (Mathews *et al.* 2015) y ser un fotorreceptor, existiendo en sistemas biológicos como bacterias, plantas, hongos, animales y humanos, entre otros (Smith 2000). Ejemplos de fotorreceptores son la hemoglobina, citocromo c oxidasa, mioglobina, flavinas, flavoproteínas, porfirinas, fitocromos, etc. (Karu 1999, Hernández-Aguilar *et al.* 2010, Mathews *et al.* 2015). Desde esta hipótesis biológica se menciona que la base de los mecanismos de estimulación láser en algunos estados fisiológicos de las plantas es el sinergismo entre el haz de luz láser monocromático y polarizado y los fotorreceptores de la luz. En la bioestimulación de plantas en sus distintas fases de desarrollo tres clases de fotorreceptores han sido descubiertos: fitocromos, fototropinas y criptocromos, los cuales absorben distintas longitudes de onda: 600-750, 320-500 y 500-630 nm, respectivamente (Levskaia *et al.* 2009, Bouly *et al.* 2007). De esta manera en la bioestimulación láser donde los láseres más empleados se encuentran en el rango del rojo, las moléculas que son excitadas son los fitocromos (Bielozierskich & Zolotariewa 1981, Koper *et al.* 1996, Abu & Tuleukhanov 2013a, Hernández-Aguilar *et al.* 2010, Muthusamy *et al.* 2012). De esta manera las semillas, con sus respectivas características (físicas, químicas, ópticas, térmicas, fototérmicas, genotípicas, fenotípicas, etc.) primero absorben la energía de la luz y entonces la transforman en energía química y la usan para sus subsecuentes procesos de crecimiento (Jamil *et al.* 2013). De esta manera la irradiación láser podría romper el equilibrio cinético de la germinación de la semilla e incrementar la energía interna de las semillas (Ferdosizadeh *et al.* 2013), variando la respuesta según cada cultivo y variedad de semilla.

Otras hipótesis en los procesos de bioestimulación láser consideran la acción térmica, esta asume que la acción de

ILBI provoca un calentamiento de células o elementos de células que eficientemente absorben la luz en la longitud de onda de irradiación láser (Popov *et al.* 2007); esto significa que una fracción de la energía de excitación es convertida en calor (Rassam 2010). De esta manera, la radiación láser podría causar incrementos de las actividades enzimáticas (Rassam 2010, Wu *et al.* 2007, Zhang *et al.* 2011) y acelera las reacciones mediadas por enzimas porque de un campo electromagnético y energía de calor afecta las moléculas en la célula (Chen *et al.* 2005a). Entonces, algunos autores están de acuerdo que los efectos del tratamiento láser en un organismo envuelven al menos efectos de la luz, efectos electromagnéticos y efectos de temperatura (Chen *et al.* 2005a, 2005b, Abu & Tuleukhanov 2013a, 2013b). Evidencias de cambios térmicos debido a la irradiación láser han sido demostradas por Hernández-Aguilar *et al.* (2015a, 2015b), quienes irradiaron semilla de maíz colocada sobre distintos contenedores, encontrando que la temperatura de la semilla se modifica en función de las características ópticas y térmicas de las semillas, así mismo depende del contenedor sobre el cual sea colocada.

En un sistema vivo cada evento que está teniendo lugar está vinculado con la producción o absorción de calor, esto conduce a cambios de temperatura del sistema. Así, el pretratamiento de las semillas de siembra por irradiación láser también se relaciona con cambios de temperatura (Jamil *et al.*, 2013), que se supone que es muy pequeña, de acuerdo al tipo de láser y tiempo de exposición y característica de la semilla (Abu & Tuleukhanov 2013a). Es importante conocer los cambios de temperatura en las semillas que han sido irradiadas con un haz láser porque podría tener importancia práctica y teórica sustancial. Dosis de radiación de baja intensidad activan las plantas, resultando en un incremento de potencial bioenergético de las células y mayor activación de sus procesos bioquímicos y fisiológicos. Altas dosis de irradiación influyen el material genético de las células dando cambios genéticos de las plantas (Rybiński 2000, Ashrafijou *et al.* 2010).

La Tabla I resume los avances de los efectos de la ILBI encontrados de acuerdo a la revisión de literatura de los últimos años, producto de varias actividades científicas en el mundo. Presentando los bioefectos de la luz láser de baja intensidad en semillas y plantas, que permite vislumbrarlo con un uso potencial como tratamiento a la semilla en distintas etapas fenológicas y condiciones de estrés.

TABLA I. Resumen de la Bioestimulación LÁSER.

TABLE I. Summary LASER Biostimulation.

ESPECIE DE PLANTA	CRITERIO EXPERIMENTAL	$\lambda$ (nm)	I (mW/cm <sup>2</sup> ) y/o P(mW)	R	TIEMPOS DE EXPOSICIÓN (S) Y/O DOSIS	BIOESTIMULACIÓN LÁSER	B
<b>LÁSER DE He-Ne</b>							
<i>Triticum aestivum</i>	Semillas esterilizadas durante 10 min con 1% de NaClO, y después se lavaron con H <sub>2</sub> O durante 10 min. Se cultivaron en cajas Petri y las Plantas fueron irradiadas diariamente.	630	543 mW/cm <sup>2</sup>	1	120 s	Alivió los efectos dañinos de la radiación UV-B en plántulas de trigo por el cambio de las características de filamentos de actina. Es decir, la actina participó en el proceso de reparación producido por el láser de He-Ne (Chen-Huize & Han-Rong 2015).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Se esterilizó durante 10 min con 1% de NaClO, y lavados por 10 min con H <sub>2</sub> O. Establecida en cajas Petri y papel filtro ubicadas en cámara de crecimiento.	632,8	500 mW/cm <sup>2</sup>	1	60, 120, 180, 240 y 300 s	Mejora la eficiencia fotosintética de trigo expuesto a mayor radiación UV-B teniendo el tratamiento Láser un efecto positivo en los cloroplastos y alivia el daño causado por un aumento de la irradiación UV-B. Incrementó de altura de planta, longitud de raíz y azúcar soluble y niveles de proteína solubles. A ciertos parámetros inhibe el crecimiento de trigo y daña plántulas de trigo a nivel fisiológico (Chen-Huize & Han-Rong 2014).	Positiva y negativa
<i>Triticum aestivum</i> <i>Zea mays</i>	La mayor parte de las semillas fueron plantadas al aire libre y otras en Laboratorio. Expansión del haz con colimador de láser	632,8	50 mW	1	250, 500 y 1000 s 1, 2, 4 y 6 J/cm <sup>2</sup>	La altura de las plantas procedentes de semilla tratada con irradiación láser fue considerablemente más grande que las provenientes de las semillas control (muestras no-irradiadas). La cosecha fue mayor encontrando, que la semilla húmeda es más susceptible al efecto láser que la semilla seca (Jevtić <i>et al.</i> 2015).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i> <i>Zea mays</i>	Semilla humedecida por 24 h en H <sub>2</sub> O.	632,8	50 mW	1	10 a 1000 s	Cambios morfológicos en las plantas, estas fueron más altas, más gruesas, y mayores mazorcas en el caso del maíz (Srećković <i>et al.</i> 2014).	Positiva y negativa
<i>Triticum aestivum</i>	La semilla fue humedecida por 3 h en H <sub>2</sub> O destilada previa irradiación, posteriormente se secó con aire y se colocaron en caja oscura para la irradiación.	632,8	100 mW/cm <sup>2</sup>	1	0,1, 0,3 y 0,5 J	Cambios en las características de germinación, entalpía, generación de entropía, flujo de entropía y actividades enzimáticas, así como cambios en los atributos morfológicos. La energía de germinación, % de germinación, índice de germinación y actividades de amilasa y proteasa se incrementaron (Jamil <i>et al.</i> 2013).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Semilla esterilizada con NaClO, enjuagada con H <sub>2</sub> O. Ubicada en una capa para la irradiación. Reportan que no existió efecto térmico.	632,8	5,23 mW/cm <sup>2</sup>	1	1, 3, 10, 30, 60, 180, 600, 1200 y 1800 s	Induce cambios de índice de germinación incrementando el nivel de peróxido de hidrógeno de las hojas sin cambios significativos y la peroxidación lipídica. Superóxido dismutasa fue decrecida con respecto a la actividad enzimática en los tejidos de las plantas (Abu-Elsaoud & Tuleukhanov 2013a).	Positiva y negativa
<i>Triticum aestivum</i>	Semillas bajo estrés de cadmio.	632,8	-	-	300 s	Confriró tolerancia ante el estrés de cadmio en plántulas de trigo mediante el decremento de contenido de malondialdehído e incrementó las actividades de superóxido dismutasa, peroxidasa, catalasa, ascorbato peroxidasa y contenidos de ácido ascorbato y de glutatión (Li-Jinting <i>et al.</i> 2013).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Semillas uniformizadas y esterilizadas por 3min mediante su inmersión en 0.01 porcentaje de HgCl <sub>2</sub> . Previo a la irradiación humedecidas 24 h y después secadas. Irradiación hacia el embrión.	632,8	543 mW/cm <sup>2</sup>	1	300 s	El uso del pretratamiento láser de He-Ne incrementa tolerancia de plántulas ante el estrés de cadmio, hubo un efecto fisiológico positivo en el crecimiento de plántulas estresadas con dicho elemento (Qiu <i>et al.</i> 2013).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Semilla esterilizada con NaCl, enjuagada con H <sub>2</sub> O. Siembra en hidrogeles. Ubicada en una capa para la irradiación. No causó efecto térmico.	632,8	5,23 mW/cm <sup>2</sup>	1	1, 3, 10, 30, 60, 180, 600, 1200 y 1800 s	Incrementó el % de germinación, el nivel de peróxido de hidrógeno y la peroxidación lipídica. Superóxido de dismutasa decreció con respecto a la actividad enzimática en tejidos de las plantas. Siendo el incremento inversamente proporcional con respecto al incremento del tiempo del láser (Abu-Elsaoud & Tuleukhanov 2013b).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Semillas uniformizadas y esterilizadas por 10 min con 0.1% HgCl <sub>2</sub> , lavadas durante 50 min con H <sub>2</sub> O. Sembradas en cajas Petri bajo luz fluorescente blanca.	650	397 mW/cm <sup>2</sup>	d	120 s	Láseres de He-Ne podrían significativamente aliviar el daño inducido por la radiación UV-B en el trigo, existió consistentemente una mayor expresión de catalasa (Zhenhu Jia & Jiangyan Duan 2013).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Semilla humedecida por 1 h antes de la irradiación. Empleándose en el experimento semilla seca y humedecida uniformes en tamaño.	632,8	-	1	60,120,240 y 360 s	Se mejoró la captación, así como la translocación de iones de Zn, presentando mejor captación las semillas humedecidas. En caso de las semillas no humedecidas las que tuvieron mejor captación de zinc fueron las semillas tratadas a 2 min de irradiación pre-siembra (Joshi <i>et al.</i> , 2012).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Semillas uniformizadas y esterilizadas por 10 min con 0.1% HgCl <sub>2</sub> y lavadas por 50 min con H <sub>2</sub> O. Prueba establecida en cajas Petri y papel filtro humedecida. Sembradas en caja Petri para la irradiación. Radiación también aplicada a nivel de plantas.	632,8	543 mW/cm <sup>2</sup>	1	240 s	El láser He-Ne alivió parcialmente la lesión de la radiación UV-B, la germinación y la tasa de crecimiento de los brotes se mejoraron junto con el desarrollo de la raíz. El contenido de clorofila y la expresión de peroxidasa aumentaron. Aumentaron la altura de las plántulas y biomasa (Liyang-Yang <i>et al.</i> 2012).	Positiva

$\lambda$  = Longitud de onda; I = Intensidad ; P = Potencia ; R = Régimen de irradiación ; B = Bioestimulación; d = diariamente. /  $\lambda$  = Wavelength; I = Intensity; P= Power; R= Irradiation regime; B = Biostimulation; d = Daily.

TABLA I. Continuación.

TABLE I. Continuation.

ESPECIE DE PLANTA	CRITERIO EXPERIMENTAL	$\lambda$ (nm)	I (mW/cm <sup>2</sup> ) y/o P(mW)	TIEMPOS DE EXPOSICIÓN (s) y/o Dosis	BIOESTIMULACIÓN LÁSER	B
<i>Solanum lycopersicum</i>	Fueron sembradas en cepellones en un sustrato al 60% de humus de lombriz, 30% turba rubia y 10% cascarilla de arroz. Se produjo una huella de luz @ de 10cm.	632,8	2,5 mW/cm <sup>2</sup>	5, 10, 20, 30 y 60 s	Incrementaron los indicadores evaluados como número de flores por plantas, número de frutos por plantas, número de racimos por plantas, diámetro medio polar, diámetro medio ecuatorial, peso de los frutos y rendimiento por plantas (Álvarez <i>et al.</i> 2013).	Positiva
<i>Solanum melongena</i>	Semillas sanas y uniformes fueron seleccionadas humedecidas en H <sub>2</sub> O destilada durante tres horas. Germinación <i>in vitro</i> .	632,8	7 mW 4,02 mW/cm <sup>2</sup>	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 J/cm <sup>2</sup>	Incrementó germinación de semillas, longitudes de brotes y raíces y peso fresco de brotes y peso seco de raíz, así como el número de hojas de las plántulas, nivel de clorofila y carotenoides. La respuesta bioquímica mejoró, evidenciado a través de las actividades mejoradas de amilasas y proteasas (Muthusamy <i>et al.</i> 2012).	Positiva
<i>Solanum lycopersicum</i>	Experimento realizado por la mañana a 25°C. Se utilizó como sustrato: humus de lombriz 60%, turba rubia 30% y cascarilla de arroz 10%. Experimento hasta cosecha.	632,8	25 mW 2,5 mW/cm <sup>2</sup>	5, 10, 20, 30 y 60 s	Hubo incremento en altura de las plantas, longitud de la raíz, diámetro del tallo, diámetro medio ecuatorial, masa promedio de los frutos y rendimiento por plantas, respecto al control. El % de germinación solo presentó una tendencia de comportamiento a incrementar (Álvarez <i>et al.</i> 2011a).	Positiva
<i>Solanum lycopersicum</i>	El contenido de % de humedad de las semillas fue del 12-13% y el % de germinación de 98 %. Siembra en casa productora de posturas, utilizando bandejas y como sustrato una composición de: humus, turba rubia, y cascarilla de arroz. Haz de luz de 10 cm <sup>2</sup> .	632,8	25mW 2,5 mW/cm <sup>2</sup>	5, 10, 20, 30 y 60 s	En porcentaje de germinación no se manifestaron efectos, pero se incrementaron significativamente los indicadores del crecimiento (diámetro del tallo, longitud de raíz, altura de plantas) con tiempos de exposición de 5, 10 y 20 s, alcanzando los mayores valores de estimulación en la altura de la plantas a un t = 20 s (Álvarez <i>et al.</i> 2011b).	Positiva nula
<i>Beta vulgaris</i>	Experimentos en Laboratorio y experimentos de campo.	670	200 mW	2.5 x 10 <sup>-2</sup> J cm <sup>-1</sup>	Modificó el rango de clorofila <i>a</i> y <i>b</i> . Las hojas y raíces de las plantas se caracterizaron por más alto contenido de materia seca. La estimulación de semilla tuvo una influencia positiva en productividad y contenido de sacarosa. El tratamiento con siete regímenes tuvieron mayor contenido de materia seca (Prošba -Biaczyk <i>et al.</i> 2013).	Positiva
<i>Beta vulgaris</i>	Experimento en condiciones de Laboratorio y de campo.	632,8	-	2.5 x 10 <sup>-1</sup> J/cm <sup>2</sup>	Mayor concentración de carotenoides y de clorofila en las plántulas provenientes de semilla irradiada, influencia positiva en productividad y más bajo contenido de sacarosa y sustancias formadoras de melazas (Prošba-Biaczyk <i>et al.</i> 2011).	Positiva
<i>Ricinus communis</i>	Estudio en invernadero, Cultivadas en macetas con suelo franco arcilloso.	632,8	-	0 - 300 s	Aumento en el área foliar y el contenido de citoquinina en hojas de gerbera (Metwally 2014).	Positiva
<i>Nigella sativa</i>	Semillas sembradas en arena en granja experimental, acondicionado sistema de riego por goteo. Semilla humedecida por 24 h en H <sub>2</sub> O. % de humedad de semillas secas (7,7) y humedecidas (50,2) antes de la irradiación.	632,8	-	0, 300, 600, 900, 1800, 2700 y 3600 s	Para semilla seca hubo un incremento en porcentaje de germinación en los tiempos de 10 y 45 minutos. La semilla sin radiación (control) y tratamiento laser de 5 min, presentó la más baja germinación. Siendo la más alta germinación final en 10 min (Maamoun <i>et al.</i> 2014).	Positiva y negativa
<i>Lathyrus sativus</i>	Establecidas a nivel de Laboratorio e invernadero, emplearon macetas de barro. Semillas irradiadas sin especificar condición alguna para la irradiación.	632	24 mW 1mW/ cm <sup>2</sup>	30, 60 y 90 s	Incrementan las aberraciones meióticas con correlación positiva con la dosis de tratamiento láser. Consideran al láser como un mutágeno y lo encuentran como una posibilidad para incrementar productividad (Ritambhara & Girjesh 2013).	Positiva
<i>Lathyrus sativus</i>	Análisis citológicos de las células de la raíz y prueba de germinación. Radiación perpendicular y a 20 cm de la fuente de luz.	632	-	30, 60 y 90 s	Inhibió germinación con respecto a las semillas no irradiadas. La prueba citológica, señaló una regresión de índice mitótico con el incremento de la dosis de luz láser. En ese intervalo de tiempo para ese tipo de semilla no hubo bioestimulación positiva. (Ritambhara & Girjesh 2011).	Negativa
<i>Celosia argentea</i>	Estudio en invernadero.	632,8	3 660 mW/cm <sup>2</sup>	0,120, 180 y 360 s	Estimuló e incrementó la altura de las plantas, y el número de hojas por planta, al aumentar el tiempo de exposición estos valores disminuyeron (Metwally <i>et al.</i> 2013).	Positiva y negativa
<i>Brassica napus</i>	Experimentos llevados a cabo con NaCl como estrés salino. Suelo franco-arcilloso con pH=7,5. Estrés salino en tres niveles.	632,8	0, 1,5 , 3,0 , 4,5 , 6 y 7,5 mW/cm <sup>2</sup>	1800 s	Tratamiento láser tuvo efecto positivo en porcentaje y velocidad de germinación, pero no tuvo efectos en crecimiento de plántulas (Rasouli <i>et al.</i> 2012).	Positiva y nula
<i>Balanites aegyptiaca</i>	Raíces de árbol, crecimiento <i>in vitro</i> .	632,8	100 mW/cm <sup>2</sup>	0, 240, 480 y 720 s 0, 60, 180 y 300 s	Incrementó el número y longitud de raíces, espesor de vena de la planta, a excepción del tratamiento a 12 min donde se decrementó al compararla con respecto al control. Los mejores bioefectos fueron encontrados en la planta del tipo <i>Balanites aegyptiaca</i> (Fathy <i>et al.</i> 2012).	Positiva y negativa
<i>Faba bean var. albus</i>	Prueba de actividad de enzimas amilolíticas colocadas en placas Petri y papel filtro rociadas con agua bidestilada.	632,8	4 x 10 <sup>-3</sup> J/cm <sup>2</sup> /s	4x 10 <sup>-3</sup> J/cm <sup>2</sup> /s	Se incrementó la actividad de enzimas amilolíticas, la concentración de radicales libres, el peso fresco en el tiempo de imbibición, teniendo una temprana y uniforme germinación. El incremento mayor fue en cinco exposiciones de luz láser (Podlešny <i>et al.</i> 2012).	Positiva

$\lambda$  = Longitud de onda; I= Intensidad ; P= Potencia ; R = Régimen de irradiación ; B = Bioestimulación; d = diariamente. /  $\lambda$  = Wavelength; I = Intensity; P= Power; R= Irradiation regime; B = Biostimulation; d = Daily.

TABLA I. Continuación.

TABLE I. Continuation.

ESPECIE DE PLANTA	CRITERIO EXPERIMENTAL	$\lambda$ (nm)	I (mW/cm <sup>2</sup> ) or P(mW)	R	Tiempos de irradiación	BIOESTIMULACIÓN LÁSER	B
<i>Raphanus sativus</i>	Pruebas en vivero de horticultura, empleando semillas de distintos ciclos productivos con distinto % de germinación.	632,8	6 mW/cm <sup>2</sup>	5	30 s	Influye favorablemente en el incremento de peso seco de plántulas. La respuesta del láser dependió de la calidad fisiológica de la semilla. Hubo incremento de la germinación. En semilla con germinación alta el efecto no fue evidente (Krawiec <i>et al.</i> 2012).	Positiva y nula
<i>Helianthus annuus</i>	Las semillas fueron humedecidas en H <sub>2</sub> O destilada y después secadas con papel filtro y aire. La irradiación fue semilla por semilla.	632,8	-	1	0, 100, 300 y 500 mJ	Aumenta significativamente parámetros bioquímicos, fisiológicos y de rendimiento, por lo que el método láser puede ser empleado con eficacia para mejorar la producción y rendimiento de girasol (Perveen <i>et al.</i> 2011).	Positiva
<i>Helianthus annuus</i>	Experimento en condiciones de invernadero. Semillas humedecidas por tres horas en H <sub>2</sub> O destilada. Onda de láser continua.	632,8	-	1	0, 100, 300 y 500 mJ	Incrementa las actividades de amilasas y proteasa, conduciendo a incremento de germinación. El tratamiento láser podría ser beneficioso para los agricultores en condiciones de campo, así como bajo condiciones ambientales adversas (Perveen <i>et al.</i> 2010).	Positiva
<i>Carthamus tinctorius</i>	Semillas sembradas en macetas. Para los estudios mitóticos se sembraron en papel filtro.	635	24mW 1mW/cm <sup>2</sup>	-	1800, 3600 y 5400 s	Reducción de frecuencia de división celular, anomalías cromosómicas también reportadas. Al incrementar la dosis, incrementaron las anomalías meióticas (Kumar & Srivastava 2010).	Negativa
<i>Medicago sativa</i>	Experimentos de campo. Semillas irradiadas en caída libre.	632,4	0, 3 y 6 mW/cm <sup>2</sup>	1 3 5	0,1 s	Causó un aumento significativo en el contenido de proteína, fósforo y molibdeno de materia seca de las plantas, y una disminución en el contenido de fibra cruda (Cwintal <i>et al.</i> 2010).	Positiva y negativa
<i>Acacia farnesiana</i>	Establecidos durante dos estaciones sucesivas en cajas Petri esterilizadas en Laboratorio colocando papel filtro humedecido con H <sub>2</sub> O destilada. Semillas obtenidas de fruto maduro de árboles de <i>Acacia farnesiana</i> L.	632,8	30, 200, 610, 1140, y 1700 mW/cm <sup>2</sup>	1	60, 180, 300, 420 y 480 s	Incrementó niveles de sustancias promotoras endógenas y decremento sustancias inhibitorias endógenas en la cubierta de la semilla. La irradiación de I = 1.70 W/cm <sup>2</sup> por 9 min, afecta significativamente el índice de germinación. La impermeabilidad al agua de esta semilla podría ser resuelta, al permitir que un haz de luz láser irradie las semillas (Soliman & Harith, 2009).	Positiva
LÁSERES DE DIODOS							
<i>Triticum aestivum</i> <i>Zea mays</i>	Semillas humedecidas por 24 h, ubicadas en una sola capa de manera fija siendo radiadas una por una.	904	12 mW	-	10 a 1000 s	Cambios morfológicos en las plantas, estas fueron más altas, más gruesas y mayores mazorcas en el caso del maíz (Srećković <i>et al.</i> 2014).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Semillas homogéneas y esterilizadas por 10 min en solución de 0.1% de HgCl <sub>2</sub> y lavadas con H <sub>2</sub> O por 50 min. Germinación en papel filtro.	660 980 532	11000 mW/cm <sup>2</sup> 25000 mW/cm <sup>2</sup> 7500mW/cm <sup>2</sup>	1 2	720 s	Modificó germinación y rendimiento, siendo la mejor eficiencia con láser de 532 nm, a dos regímenes de irradiación. Los efectos de bioestimulación fueron más evidentes a mayor concentración salina, presentándose el láser como una opción para áreas de siembra salinas (Ferdosizadeh <i>et al.</i> 2013).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Estudios en campo de rotación constante. Las plantas fueron tratadas en la fase de crecimiento.	650	25 mW	d	-	Aumentó rendimiento y la resistencia a enfermedad, así como proteínas y contenido de gluten (Androsova <i>et al.</i> 2013).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Experimentación en condiciones de Laboratorio ubicando la semilla en el área central de huella del láser de diodo.	980	15, 30 y 60 mW/cm <sup>2</sup>	1	15, 30, 60, 120 y 240s	Solo a la dosis de 60mW/cm <sup>2</sup> hubo bioestimulación positiva en los tiempos de 30, 60 y 120 s para longitud de coleóptilo y sistema radicular, todos los demás tratamientos bioestimularon negativamente (Hernández V. & Michtchenko 2012).	Positiva y negativa
<i>Triticum aestivum</i> <i>blackberry (Black Satin)</i>	Experimentos de plantas blackberry cultivadas in vitro, la prueba de germinación de trigo entre capas de papel húmedo.	532, 655	0,1 mW/cm <sup>2</sup>	1	60, 120, 240 y 480 s 15, 30, 60, y 120 s	La irradiación láser con luz roja tuvo una mejor estimulación que la luz verde, siendo la mejor estimulación mediante el empleo del láser He-Ne a partir de los 240 s manifestado en la longitud promedio del sistema de raíz (Budagovskii <i>et al.</i> 2012).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Pruebas bajo condiciones de laboratorio de acuerdo a la ISTA en cámara de germinación.	980	15, 30 y 60 mW/cm <sup>2</sup>	1	15, 30, 60, 120 y 240s	Incrementó e inhibió la longitud del coleóptilo y del sistema radicular; a los 15 mW/cm <sup>2</sup> , decremento la longitud del coleóptilo a partir de los 30 s. A 60mW/cm <sup>2</sup> de exposición decremento a los 15 y en 30 y 60 s tendió a incrementar, para después volver a decrementar en 120 y 240 s (Mitchenko & Hernández 2010).	Positiva y negativa
<i>Lemna minor</i> <i>Iris pseudoacorus</i>	Se irradiaron plantas completas colocadas perpendiculares al haz de luz a una distancia de 20 cm. Se establecieron en estanques con aguas residuales y en cajas Petri sobre tierra contaminada con cadmio.	660, 670 473	20 mW	1	3,30s	Mostró que la selección apropiada de los parámetros de estimulación permite obtener un mayor crecimiento de biomasa, cambios en el contenido de elementos de la biomasa e incrementa la resistencia de las plantas ante condiciones ambientales desfavorables (Štiwka 2014).	Positiva y negativa
<i>Lemna minor</i>	Suelo contaminado. La incidencia del haz de radiación era perpendicular y 20 cm entre la fuente de luz y plantas irradiadas.	660	20 mW	3	3s	Aumenta la capacidad de adaptación de diferentes especies de plantas crecidas en ambientes contaminados. Aceleró la fitorremediación de fósforo y nitrógeno de las aguas residuales y aumento la superficie de la lenteja de agua y la producción de biomasa (Dobrowolski <i>et al.</i> 2012b).	Positiva
<i>Iris pseudoacorus</i>	Pruebas con contaminantes, evaluación en procesos de fitorremediación.	660 473	20 mW	3	3s	Acelera la división celular e incrementa la biomasa, siendo más eficiente la absorción de elementos biogénicos (N, P) contenido en las aguas residuales, lo que frena el proceso de eutrofización. Influencia benéfica se extendió a la temporada de vegetación de las plantas (Štiwka & Jakubiak 2010a).	Positiva

$\lambda$  = Longitud de onda; I = Intensidad; P = Potencia; R = Régimen de irradiación; B = Bioestimulación; d = diariamente /  $\lambda$  = Wavelength; I = Intensity; P= Power; R= Irradiation regime; B = Biostimulation; d = Daily.

TABLA I. Continuación.

TABLE I. Continuation.

ESPECIE DE PLANTA	CRITERIO EXPERIMENTAL	$\lambda$ (nm)	I (mW/cm <sup>2</sup> ) or P(mW)	R	TIEMPOS DE EXPOSICIÓN (s)	BIOESTIMULACIÓN LÁSER	B
<i>Salix viminalis</i>	Esquejes tratados y cultivados en hidroponía	660 514	-	3	10 y 30 s	Tuvieron los mejores resultados en términos de número de raíces y brotes después de 7 días. El mejor crecimiento de raíces y brotes fue en el tratamiento con diodo láser de 514 nm. Esquejes tratados con láser de 514 nm mostraron el mayor crecimiento después de tres semanas del cultivo enraizado en suelos contaminados industrialmente (Rimal <i>et al.</i> 2014).	Positiva
<i>Salix viminalis</i>	Esquejes de sauce, variedad resistente a enfermedades y tolerante a insectos. Distancia de la fuente al material biológico fue de 20 cm. Incidencia de luz de manera perpendicular al material biológico.	473 670	20mW 20 mW	3	30 s	Aumento significativo de biomasa y se acelera el crecimiento (Jakubiak & Gdowska 2013).	Positiva
<i>Hordeum vulgare</i>	Pruebas de calidad sanitaria en cajas Petri. Previo a la irradiación semilla fue homogeneizada y radiada bajo dos condiciones en su forma natural y teñida con azul metileno.	650	27.4mW	1	0, 60, 120, 240 y 480 s	Mejoró la calidad sanitaria de la semilla, ya que decrementó la cantidad de semilla con microbiota naturalmente asociada en todos los tiempos de radiación aplicadas, en ambas condiciones de semilla teñida y no teñida. Encontrando un menor tiempo de irradiación en la semilla teñida, para obtener el mejor resultado de reducción de semilla infectada (Pérez <i>et al.</i> 2015).	Positiva
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Semilla humedecida con H <sub>2</sub> O destilada y establecida en cajas Petri. Variedades de distinto ciclo agrícola. Haz de luz expandido con lente.	408	150 mW	18	Alternando 600 s de irradiación y 1800 s sin irradiación durante 24h	Efectos de bioestimulación positiva y negativa, semillas con más alta longitud de penetración óptica obtuvo bioestimulación positiva en porcentaje de germinación. La bioestimulación vario dependiendo el ciclo productivo y las características ópticas de las semillas (Sánchez <i>et al.</i> 2015).	Positiva y negativa
<i>Viburnum rhytidophyllum</i>	Esquejes tratados con hormona de enraizamiento. Experimentos en invernadero. Incidencia del haz de luz sobre las partes inferiores de los esquejes.	670	200 mW	3 6	-	Longitud de las raíces fue incrementada, la triple irradiación de esquejes mejoró el número de raíces con respecto al control, seis irradiaciones redujeron el número de raíces (Szajnsner & Bąbelewski 2014).	Positiva y negativa
<i>Vigna radiata</i>	Pruebas de germinación de acuerdo a la ISTA, bajo condiciones de Laboratorio.	IR	-	1	30, 60, 90, 120 y 150 s	Aumentó el % de germinación, velocidad de germinación, longitud de raíz, peso seco de plántulas índice de vigor I y II, actividad de nitrato reductasa y actividad de nitrato reductasa en la cosecha de poroto chino (judía) (Tiwari <i>et al.</i> 2014).	Positiva
<i>Juniperus sp.</i>	Experimentos en Invernadero Esquejes irradiados.	670	200 mW	3 6 12	$2,5 \times 10^{-1} \text{J/cm}^2$	Incrementó significativamente el porcentaje de esquejes enraizados en todas las variedades evaluadas, la dosis de tres regímenes fue la que dio mejores resultados en todas las variedades (Babelewski & Szajnsner 2014).	Positiva
<i>Beta vulgaris</i>	Experimentos en campo. Siembra inmediatamente después de la irradiación.	670	200 mW	5 7	0,25 J/cm <sup>2</sup>	La estimulación láser depende del genotipo de semilla, encontrándose incrementos en la acumulación de materia seca de raíz y de concentración de azúcares. La radiación láser modifica procesos fisiológicos en etapas posteriores de siembra en función de parámetros de irradiación (Sacala <i>et al.</i> 2012).	Positiva
<i>Brassica napus</i>	Experimento en invernadero, varios niveles de estrés salino, colocando NaCl en la tierra (fina arena y estiércol). Las semillas fueron humedecidas antes de la irradiación por 12 h en H <sub>2</sub> O destilada.	532	2500 mW	1	900, 1800, 2700, 3600 y 4500 s	Mejora rendimiento de canola en condiciones de estrés salino, tratamiento por 45 min tuvo mejor efecto para incrementar productividad bajo condiciones normales de siembra. En condiciones de estrés salino, la más alta salinidad y pretreatmento 75 min, tuvo la más baja productividad por planta (Mohammadi <i>et al.</i> 2012).	Positiva
<i>Zea mays</i>	Pruebas de papel secante en condiciones de laboratorio Semilla fotosensibilizada antes de la irradiación láser con azul metileno.	655	27.4 mW 4.6 mW/cm <sup>2</sup>	1	30, 60, 180, 300 y 600 s	Se disminuyó significativamente la cantidad de semilla infectada con hongo <i>Fusarium</i> spp. La irradiación láser podría ser una alternativa para controlar enfermedades en semillas de maíz (Hernández-Aguilar <i>et al.</i> 2011).	Positiva y negativa
<i>Dianthus caryophyllus</i> <i>Petunia hybrida</i>	Experimentos en macetas Distancia desde la fuente de irradiación a la planta irradiada fue de 15 cm.	660	200 mW	1	300, 420 y 600 s	Existieron diferencias positivas significativas en tasa de crecimiento, número de brotes y número de hojas formadas. La respuesta a la radiación varió en función de la especie estudiada. La influencia de la radiación láser es beneficioso para las plantas (Dănăilă-Guidea <i>et al.</i> 2011).	Positiva
<i>Sorghum bicolor</i>	La germinación de semillas se realizó inicialmente en cajas Petri por 5 días bajo condiciones controladas de temperatura y luz, posteriormente las plántulas se transfirieron a campo experimental. Semillas de líneas puras fueron utilizadas	600	60 mW	1	600 s	Induce alteraciones significativas en el nivel de metilación del ADN, por lo que el tratamiento podría ser epigenéticamente mutagénico. El uso combinado de la hibridación intraespecífica y un tratamiento láser con bajas dosis de irradiación láser puede representar un medio útil para generar variaciones epigenéticas heredables en plantas de sorgo (Wanga <i>et al.</i> 2010).	Positiva

$\lambda$  = Longitud de onda; I = Intensidad; P = Potencia; R = Régimen de irradiación; B = Bioestimulación; d = diariamente. /  $\lambda$  = Wavelength; I = Intensity; P = Power; R = Irradiation regime; B = Biostimulation; d = Daily.

TABLA I. Continuación.

TABLE I. Continuation.

ESPECIE DE PLANTA	CRITERIO EXPERIMENTAL	$\lambda$ (nm)	I (mW/cm <sup>2</sup> ) or P(mW)	R	TIEMPOS DE EXPOSICIÓN (s)	BIOESTIMULACIÓN LÁSER	B
LÁSERES DE Ar, Nd-Yag y CO <sub>2</sub>							
<i>Triticum turgidum</i>	Experimentos conducidos en invernadero establecidas con condiciones de estrés salino. Semillas uniformizadas por tamaño.	532	75 mW/cm <sup>2</sup>		720 s	La radiación láser se puede utilizar en el mejoramiento de trigo, ya que afecta el metabolismo de las plantas, se reportan incrementos en el contenido de proalina (Zare <i>et al.</i> 2014).	Positiva
<i>Triticum durum</i>	Experimentos en laboratorio, germinadas en cajas Petri y en la oscuridad. No fueron aplicados químicos extras o fotosensibilizadores antes de la irradiación. Semilla seca y humedecida durante 24 h.	532	20 mW	1	60, 300, 600, 900 s	Láser de 532 nm podría emplearse para esterilizar la semilla de trigo y mejorar su crecimiento y desarrollo. La irradiación podría ser un método alternativo para controlar la infección de semillas por hongos (Rassam <i>et al.</i> 2012).	Positiva
<i>Triticum aestivum</i>	Semillas uniformizadas y esterilizadas por 10 min en 0,05% HgCl <sub>2</sub> , lavadas durante 30 min con H <sub>2</sub> O y secadas. Sembradas en cajas Petri y después de dos días se sometieron a estrés de frío 24 h.	10 600	2000 mW/cm <sup>2</sup>	1	300 s	Mejora la tolerancia fisiológica de las plántulas de trigo al estrés debido a baja temperatura, mejorando el metabolismo fisiológico de señal así como los sistemas de defensa enzimática y no enzimática, mejorando su crecimiento (Chen <i>et al.</i> 2010).	Positiva
<i>Lemna minor</i>	Plantas irradiadas, donde la incidencia del haz de luz fue perpendicular a la planta. Separando la fuente de luz y la planta 20 cm.	514	20 mW	3	3 s	La disminución o desaparición de los síntomas de clorosis y posterior defoliación se observaron en el grupo de plantas irradiadas en tres regímenes de irradiación por 3 s (Dobrowolski <i>et al.</i> 2012b).	Negativa
<i>Glycine max</i>	Experimento llevado a cabo en invernadero, colocando las semillas en macetas (llenas de arena, arcilla y peat moss. Semillas almacenadas un mes en la oscuridad antes del tratamiento con la luz láser. Haz de luz a través de un lente (objetivo microscópico) que permitió irradiar 12 semillas a la vez.	532	25 mW	1	300, 600, 1800, 3600 y 7200 s	Semillas tratadas mostraron temprana emergencia durante la germinación, un crecimiento potencial a las 4 semanas de siembra, a los tres meses las plantas tuvieron hojas de tamaño mayor y de color verde más intenso que las de control. El crecimiento vegetativo de plántulas de soya fue significativamente mayor después del tratamiento con láser Nd-Yag (Khalifa & El Ghandoor 2011).	Positiva
<i>Lemna minor</i>	Se irradiaron plantas completas perpendiculares al haz de luz a una distancia de 20 cm.	514	20 mW	1	Lenteja de agua	Plantas caracterizadas por tener abundante y temprana floración (Śliwka 2014).	Positiva
<i>Iris pseudoacorus</i>	Se establecieron en estanques con aguas residuales en cajas Petri sobre tierra contaminada con cadmio.		21 mW		3 s		
			20 mW		Iris amarillo		
			20 mW		30 s		

$\lambda$  = Longitud de onda; I= Intensidad; P= Potencia; R = Régimen de irradiación; B = Bioestimulación; d = diariamente, Nd-Yag (532nm), CO<sub>2</sub> (10 600nm), Ar (514nm). /  $\lambda$  = Wavelength; I = Intensity; P= Power; R= Irradiation regime; B = Biostimulation; d = Daily, Nd-Yag (532nm), CO<sub>2</sub> (10 600nm), Ar (514nm).

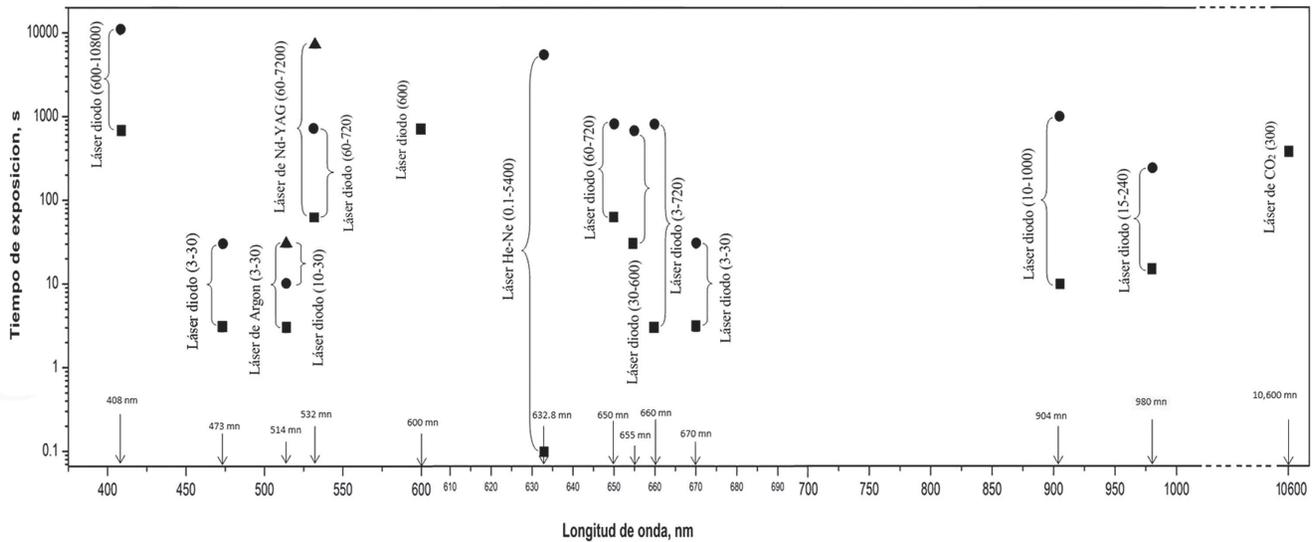


FIGURA 1. Tiempos de irradiación de diferentes láseres aplicados como tratamiento de semilla y plántulas.

FIGURE 1. Irradiation times of different lasers applied as treatment of seeds and seedlings.

## CONCLUSIONES

Los láseres que podrían ser empleados en los próximos años por su precio, manejo fácil y efectos encontrados, son los láseres principalmente de diodos en el rango rojo y verde. Los mecanismos de bioestimulación láser deben de seguirse estudiando, así como simulaciones a nivel micro y macroefectos de comportamiento de semilla agrícola de acuerdo a sus características para poder predecir los parámetros óptimos de irradiación láser que produzcan efectos favorables. Hasta el momento, diversos estudios han demostrado que la luz láser aplicada a semillas, plántulas o plantas produce efectos positivos, negativos y nulos al evaluar los efectos de los tratamientos láser en un amplio rango de parámetros de irradiación. Por lo que se resalta la importancia de encontrar la combinación adecuada de intensidad, potencia, longitud de onda, regímenes de irradiación y tiempo de exposición para cada tipo de semilla. Los rangos de tiempos de exposición varían dependiendo del láser manejado desde 0,1 hasta 10800 s, siendo el láser empleado con los menores tiempos de exposición el láser de He-Ne y el láser con el mayor tiempo de exposición láser de diodos a 408 nm. Es importante destacar el uso de distintos regímenes de irradiación como tratamientos de las semillas y plántulas, los regímenes de irradiación de la semilla han sido desde un régimen hasta 18 regímenes de irradiación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen apoyos del IPN a través de los proyectos SIP, EDI y COFFA, y de Conacyt. Hernández-Aguilar agradece la colaboración de Cinvestav, Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma de Zacatecas y UNAM, así como a los estudiantes y posdoctorantes que han egresado del grupo de investigación (Sistemas biofísicos sostenibles aplicados a la agricultura, alimentación y medicina) y que se han permitido caminar hacia la transdisciplinariedad.

## REFERENCIAS

- ABU-ELSAOUD, A.M. & S.T. TULEUKHANOV. 2013a. Can He-Ne Laser Induce Changes in Oxidative Stress and Antioxidant Activities of Wheat Cultivars from Kazakhstan and Egypt? *Science International* 1(3): 39-50.
- ABU-ELSAOUD, A.M. & S.T. TULEUKHANOV. 2013b. Can He-Ne Laser Induce Changes in Oxidative Stress and Antioxidant Activities of Wheat Cultivars from Kazakhstan and Egypt? *Journal of Ecology of Health & Environment* 1(1): 1-11.
- AI-ZHEN, M.A., L.I. SU-HUA, W.E.I. XIAO-LI & H.A.N. RONG. 2012. Effects of He-Ne laser and enhanced ultraviolet-B radiation on MAP65s of wheat seedlings. *Journal of Biology* 4: 015.
- ALADJADIYAN, A. 2007a. The use of physical methods for plant growing stimulation in Bulgaria. *Journal Central European Agriculture* 8(3): 369-380.

- ALADJADJIYAN, A. 2007b. Case studies in food safety and environmental health integrating safety and environmental knowledge into food studies towards european sustainable development. *Chemistry Materials Science* 6: 69-74.
- ALADJADJIYAN, A. 2012. Physical factors for plant growth stimulation improve food quality, food production-approaches, challenges and tasks. In: A. Aladjadjiyan (ed.), Rijeka, pp. 145-168. Ediciones INTECH Open Access Publisher. ISBN: 978-953-307-887-8, In Tech Publisher, Rijeka, Croatia
- ALADJADJIYAN, A. & A. KAKANAKOVA. 2008. Physical methods in agro-food chain. *Journal Central European Agriculture* 9: 789-794.
- ÁLVAREZ, A., R. RAMÍREZ, L. CHÁVEZ & Y. CAMEJO. 2011a. Effect of the treatment of seeds with radiation laser of fall promotes in a hybrid of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Granma Ciencia* 15(2):1-9.
- ÁLVAREZ, A., R. RAMÍREZ, L. CHÁVEZ, Y. CAMEJO, L. LICEA, E. PORRAS & B. GARCÍA. 2011b. Efecto del tratamiento de semillas con láser de baja potencia, sobre el crecimiento y rendimiento en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Información Técnica Económica Agraria* 107(4): 290-299.
- ÁLVAREZ, A., L. CHÁVEZ, R. RAMÍREZ, Y. CAMEJO & R. POMPA. 2013. Agricultural yield in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.), from seeds treated with low-power laser. *Revista Granma Ciencia* 17(1): 1-8.
- ANDROSOVA, V.M., A.O. DIDENKO, V.V. MOROZOVSKIY & V.A. MIRONCHUK. 2013. Improvement of grain quality and energy efficiency in winter wheat protection against tan spot using treatment of vegetating plants by laser. *Science Journal KubGAU* 87(03): 1-11.
- ASHRAFIJOU, M., S.A. SADAT NOORI, A. IZADI DARBANDI & S. SAGHAFI. 2010. Effect of salinity and radiation on proline accumulation in seeds of canola (*Brassica napus* L.). *Plant Soil Environmental* 56: 312-317.
- BĄBELEWSKI, P. & H. SZAJSNER. 2014. Attemption of applying laser photostimulation to the rooting of shoot cuttings of juniper species. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus* 13(4): 135-144.
- BEHZADI, H.R., M. QARYAN & S. SHAHI. 2012. The influence of led light on basil seeds before sowing and its effects on growing and germination. *International Journal of Plant Research* 2(4): 108-110.
- BESSIS, M., F. GIRES, G. MAYER & G. NORMARSKI. 1962. Irradiation des organites cellulaires á l'aide d'un laser á rubis. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris* 255: 1010-1012.
- BIELOZIERSKICH, M.P. & T.A. ZOLOTARIEWA. 1981. Laser treatment of seeds (in Russian). *Sacharnaja Swiowkla* 2: 32-33.
- BOULY, J.P., E. SCHLEICHER, M. DIONISIO SESE, F. VANDENBUSSCHE, D.V. STRAETEN, N. BAKRIM, S. MEIER, A. BATSCHAER, P. BITTL R. GALLAND & M. AHMAD M. 2007. Cryptochrome blue light photoreceptors are activated through interconversion of flavin redox states. *Journal of Biological Chemistry* 282(13): 9383-9391.
- BUDAGOVSKII, A.V., N.V. SOLOVYKH, O.N. BUDAGOVSKAYA, I.A. BUDAGOVSKII, A. MICHCHENKO & M. HERNÁNDEZ-VIZUET. 2012. Response of plant organisms to laser irradiation of different spectral composition. *Russian Agricultural Sciences* 38(5-6): 367-370.
- CHEN, H. & R. HAN. 2014. He-Ne laser treatment improves the photosynthetic efficiency of wheat exposed to enhanced UV-B radiation. *Laser Physics* 24(10): 105602.
- CHEN, H. & R. HAN. 2015. He-Ne laser influenced actin filaments alleviate the damage of UV-B in wheat. *Laser Physics* 25(1): 5601.
- CHEN, Y.P. 2008. *Isatis indigotica* seedlings derived from laser stimulated seeds showed improved resistance to elevated UV-B. *Plant Growth Regulation* 55: 73-79.
- CHEN, Y.P. 2009. Response of antioxidant defense system to laser radiation apical meristem of *Isatis indigotica* seedlings exposed to UV-B. *Plant Signaling & Behavior* 4: 571-573.
- CHEN, Y.P., J.F. JIA & M. YUE. 2010. Effect of CO<sub>2</sub> Laser Radiation on Physiological Tolerance of Wheat Seedlings Exposed to Chilling Stress. *Photochemistry and Photobiology* 86: 600-605.
- CHEN, Y.P., Y.J. LIU, X.L. WANG, Z.Y. REN & M. YUE. 2005a. Effect of Microwave and He-Ne Laser on Enzyme Activity and Biophoton Emission of *Isatis indigotica* Fort. *Journal of Integrative Plant Biology* 47: 849-855.
- CHEN, Y.P. & B.H. SUN. 2006. Influence of laser on DTA thermal parameters of folium isatidis exposed to UV-B radiation. *Laser Technology* 30(4): 395-397.
- CHEN, Y.P. & X.L. WANG. 2004. Effects of He-Ne laser treatment seeds of *Isatis indigotica* on photosynthesis of seedlings. *Laser Technology* 28(1): 42-44.
- CHEN, Y.P., M. YUE & X.L. WANG. 2005b. Influence of He-Ne laser irradiation on seeds thermodynamic parameters and seedlings growth of *Isatis indogotica*. *Plant Science*. 168: 601-606.
- ĆWINTAL, M., A. DZIWULSKA-HUNEK & M. WILCZEK. 2010. Laser stimulation effect of seeds on quality of alfalfa *International Agrophysics* 24: 15-19.
- DĂNĂILĂ-GUIDEA, S., P. NICULIȚĂ, R. ESOFINA, P. MONA, R. MARIAN, B. FLOAREA, D. MIHAELA & G. MIHAELA. 2011. The influence of modulated red laser light on seedlings of some annual ornamental species (*Dianthus caryophyllus* and *Petunia hybrida*). *Romanian Biotechnological Letters* 16(6 Supplement): 34-39.
- DOBROWOLSKI, J. 2010. Laser biotechnology for more efficient bioremediation and sustainable development. *Journal of Biotechnology* 150: 264-265.
- DOBROWOLSKI, J.W., A. BUDAK, D. TROJANOWSKA, M. RYMARCZYK & J. MACUDA. 2012a. Laser stimulation of trichophyton mentagrophytes for the enhancement biodegradation of hydrocarbons. *Environmental Engineering and Management Journal* 11(10): 1783-1788.
- DOBROWOLSKI, J.W., M. ŚLIWKA & R. MAZUR. 2012b. Laser biotechnology for more efficient bioremediation, protection of aquatic ecosystems and reclamation of contaminated areas. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 87(9): 1354-1359.
- DOBROWOLSKI, J.W., T. WACHALEWSKI, B. SMYK, E. RÓZYCKI & W. BARABASZ. 1997. Experiments on the influence of laser light on some biological elements of the natural environment. *Environmental Management and Health* 8(4): 136-141.
- DROZD, D. & H. SZAJSNER. 2007. Effect of application of pre-sowing laser stimulation on bare-grained oat genotypes. *Acta Agrophysica* 9: 583-589.

- DUAN, Z.Y. & Z.R. YANG. 2010. Effects of Laser to Germination and Growth of Old Tartarian Buckwheat Seeds [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences (Chinese version) 2: 009.
- DUAN, Z.Y., Z.F. YANG & Z.R. YANG. 2010. Effects of He-Ne Laser Irradiation on Salt Tolerance of Tomato Seedlings [J]. Acta Laser Biology Sinica 2: 007.
- EL-KERETI, M.A., S.A. EL-FEKY, M.S. KHATER, Y.A. OSMAN & E.A. EL-SHERBINI. 2013. ZnO Nanofertilizer and He Ne Laser Irradiation for Promoting Growth and Yield of Sweet Basil Plant. Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture 5(3): 169-181.
- EL-NAGGAR, A.Y., Y.M. SHETAIA, K.A. YOUSSEF, & N.A. ISMAIL. 2012. Stimulation of the hydrocarbon compounds degrading *Saccharomyces rosinii* by low power laser radiation. Der Pharma Chemica 4(4): 1424-1434.
- FAO. 2009a. High Level Expert Forum - How to Feed the World in 2050, Global agriculture towards 2050. Office of the Director, Agricultural Development Economics Division Economic and Social Development Department, Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues\\_papers/HLEF2050\\_Global\\_Agriculture.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf)
- FAO. 2009b. High Level Expert Forum - How to Feed the World in 2050, "The technology challenge". Office of the Director, Agricultural Development Economics Division Economic and Social Development Department Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues\\_papers/HLEF2050\\_Technology.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Technology.pdf)
- FAO. 2011. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, ROMA. 4-10 pp.
- FATHY, H.M., S.A. METWALLY & L.S. TAHA. 2012. In vitro growth behavior and leaf anatomical structure of *Balanites aegyptiaca* and *Cotoneaster horizontalis* affected by different types of laser radiation. Journal of Applied Sciences Research 8(4): 2386-2396.
- FERDOSIZADEH, L., S.A. SADAT-NOORI, N. ZARE & S. SAGHAFI. 2013. Assessment Laser Pretreatments on Germination and Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Under Salinity Stress. World Journal of Agricultural Research 1(1): 5-9.
- FOLEY, J.A. 2011. Can we feed the world & sustain the planet? Scientific American 305(5): 60-65.
- FORESIGHT. 2011. El futuro de los alimentos y la agricultura. Resumen ejecutivo. Oficina del Gobierno para la Ciencia, Londres. 12-14 pp.
- GAO, L.M., Y.F. LI & R. HAN. 2014. He-Ne laser preillumination improves the resistance of tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) seedlings to high saline conditions. Protoplasma 1: 1-14.
- GEWEELY, N.S., S.A. OUF, M.A. ELDESOKY & A.A. ELADLY. 2006. Stimulation of alkalothermophilic *Aspergillus terreus* xylanase by low-intensity laser radiation. Archives of Microbiology 186(1): 1-9.
- GOVIL, S.R., D.C. AGRAWAL, K.P. RAI & S.N. THAKUR. 1983. Argon+ Laser Seed Treatment of *Vigna radiata* L. Seedlings. Proceedings of the Indian National Science Academy 49: 719-721.
- GOVIL, S.R., D.C. AGRAWAL, K.P. RAI & S.N. THAKUR. 1985. Growth responses of *Vigna radiata* seeds to laser irradiation in the UV-A region. Physiologia Plantarum 63: 133-134.
- GOVIL, S.R., D.C. AGRAWAL, K.P. RAI & S.N. THAKUR. 1991. Physiological responses of *Vigna radiata* L. to nitrogen and argon + laser irradiation. Indian Journal Plant Physiology 34: 72-76.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., A.C. CARBALLO, A. CRUZ-OREA, R. IVANOV, E. SAN MARTIN & A. MICHTCHENKO. 2005. Photoacoustic Spectroscopy Applied to the Study of the Influence of Laser Irradiation on Corn Seeds. Journal of Physique IV (France) 125: 853-855.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., A.C. CARBALLO, A. ARTOLA & A. MICHTCHENKO. 2006. Laser irradiation effects on maize seed field performance. Seed Science & Technology 34: 193-197.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., A. C. CARBALLO & P.F.A. DOMÍNGUEZ. 2007a. Effects produced by magnetic treatment to the maize seed (in Spanish). Tecnología Química 4: 115-117.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., A.C. CARBALLO, A. MICHTCHENKO & J. LÓPEZ-BONILLA. 2007b. Pre-treatment laser light on maize seed vigor. International E-journal Engineering Mathematics: Theory and Application 1: 87-94.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., A.C. CARBALLO, A. CRUZ-OREA, R. IVANOV & A. DOMÍNGUEZ P. 2008a. The carotenoid content in seedlings of maize seeds irradiated by a 650 nm diode laser: Qualitative photoacoustic study. European Physical Journal Special Topics 153: 515-518.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., M. MEZZALAMA, N. LOZANO, A. CRUZ-OREA, E. MARTÍNEZ, R. IVANOV & F.A. DOMÍNGUEZ-PACHECO. 2008b. Optical absorption coefficient of laser irradiated wheat seeds determined by photoacoustic spectroscopy. European Physical Journal Special Topics 153: 519-522.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., F.A. DOMÍNGUEZ-PACHECO, A. CRUZ-OREA, R. IVANOV, A. CARBALLO-CARBALLO, R. ZEPEDA-BAUTISTA & L. GALINDO SORIA. 2009a. Laser irradiation effects on field performance of maize seed genotypes. International Agrophysics 23: 327-332.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., F.A. DOMÍNGUEZ-PACHECO, C.A. CARBALLO, O.A., CRUZ, R. IVANOV, B.J.L. LÓPEZ & M.J.P. VALCARCEL. 2009b. Alternating magnetic field irradiation effects on three genotype maize seed field performance. Acta Agrophysica 170: 7-17.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., F.A. DOMINGUEZ-PACHECO, A. CRUZ-OREA, R. IVANOV, A. CARBALLO-CARBALLO & R. ZEPEDA-BAUTISTA. 2010. Laser in agriculture. International Agrophysics 24: 407-422.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., R.P.C. LILIANA, F. A. DOMÍNGUEZ-PACHECO, H.A.A. MARÍA, A.C. OREA & A.C. CARBALLO. 2011. Laser light on the mycoflora content in maize seeds. African Journal of Biotechnology 10(46): 9280-9288.
- HERNÁNDEZ-AGUILAR, C., F.A. DOMINGUEZ-PACHECO, A. CRUZ-OREA. 2015a. Thermal changes of maize seed by laser irradiation. International Journal of Thermophysics 36(9): 2401-2409.
- HERNANDEZ-AGUILAR, C., F.A. DOMINGUEZ-PACHECO & A.C. OREA. 2015b. Thermal effects of laser irradiation on maize seeds. International Agrophysics 29: 147-156.
- HERNANDEZ, M. & A. MICHTCHENKO. 2012. Efectos de activación e inhibición en el crecimiento del coleóptilo y del sistema radicular de semillas de trigo provocados por radiación láser ultravioleta. Información Tecnológica 23(2): 93-98.

- HOSEINI, M., F. FEQENABI, M. TAJBAKSH & H. BABAZADEH-IGDIR. 2013. Introduction of seed treatment techniques (seed priming). *International Journal of Biosciences (IJB)* 3(5): 1-12.
- IPCC. 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation a special reports of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change (Cambridge Univ. Press, 2012). [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf).
- JAKUBIAK, M. & K. GDOWSKA. 2013. Innovative environmental technology applications of laser light stimulation. *Energy and Automation* 3: 14-21.
- JAMIL, Y., R. PERVEEN, M. ASHRAF, Q. ALI, M. IQBAL & M.R. AHMAD. 2013. He-Ne laser-induced changes in germination, thermodynamic parameters, internal energy, enzyme activities and physiological attributes of wheat during germination and early growth. *Laser Physics Letters* 10(4): 045606-045614.
- JEVTIĆ, S.D., M.Ž. SREČKOVIĆ, S.S. PELEMIŠ, L.M. KONSTANTINOVIĆ, P.B. JOVANIĆ, L.D. PETROVIĆ & M.M. DUKIĆ. 2015. Laser influence to biosystems. *Hemijaska industrija* 69(4): 433-441.
- JIA, Z. & J. DUAN. 2013. Protecting effect of He-Ne laser on winter wheat from UV-B radiation damage by analyzing proteomic changes in leaves. *Advances in Bioscience and Biotechnology* 4: 823-829.
- JIANJUN, C.H.E.N., D.I.N.G. RU-NIU, T.A.N. ZUO-JUN, L.U. JUN & Y.I. WEI-SONG. 2011a. Effects of He-Ne Laser Irradiation on Cabbage Seed [J]. *Hubei Agricultural Sciences (Chinese Version)* 7: 031.
- JIANJUN, C., W. XIANFENG, W. GANG, & D. RUNIU. 2011b. Effects of He-Ne Laser Irradiation on *Brassica napus* Seed. *Farm Products Processing (Chinese Version)* 6: 035.
- JIAO, S.J., Y.P. HAN, L. ZHAO & Y.F. SONG. 2011. Effect of Femtosecond Laser Treatment on Rice Seed Germination and Seedling Growth [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences (Chinese Version)* 4: 008.
- JOSHI, S., G.C. JOSHI & H.M. AGRAWAL. 2012. Study on the effect of laser irradiation on wheat (*Triticum aestivum* L.) variety PBW-373 seeds on zinc uptake by wheat plants. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 294(3): 391-394.
- KANG, Y.J., X.H. WANG, F.J. SHAO & R. HAN. 2008. Effects on Calmodulin of Wheat Seedlings Exposed to Enhanced Ultraviolet-B Radiation and Irradiated by He-Ne Laser [J]. *Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition)* 1: 025.
- KARU, T.I. 1999. Primary and Secondary Mechanisms of Action of Visible to Near-IR Radiation on Cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 49: 1-17.
- KATAŃSKA, A., W. RYBIŃSKI & Z. BRODA. 2003. Influence of Helium-Neon Laser on androgenesis in some chosen varieties of winter triticale (in Polish). *Acta Agrophysica* 2: 559-566.
- KHALIFA, N.S. & H. EL GHANDOUR. 2011. Investigate the Effect of Nd-Yag Laser Beam on Soybean (*Glycine max*) Leaves at the Protein Level. *International Journal of Biology* 3(2): 135-144.
- KOPER, R. 1994. Presowing laser biostimulation of seeds of cultivated plants and its results in agrotechnics. *International Agrophysics* 8: 593-596.
- KOPER, R., B. KORNAS-CZUCZWAR, T. PRÓCHNIK & J. PODLEŚNY. 1999. Effect of pre-sowing laser biostimulation of white lupine seeds on mechanical properties of crop yield. *Inżynieria Rolnicza* 2: 21-28.
- KOPER, R., S. LAZIAK, & Z. WOŹNIAK. 1997. A device for pre-sowing laser bio-stimulation of seeds of chosen cultivated plants and the results of its application. *Inżynieria Rolnicza* 1: 63-69.
- KOPER, R., S. WOJCIK, B. KORNAS-CZUCZWAR & U. BOJARSKA. 1996. Effect of the laser exposure of seeds on the yield and chemical composition of sugar beet roots. *International Agrophysics* 10: 103-108.
- KOUCHEBAGH, S.B., F. FARAHVASH, B. MIRSHKARI, H.K. ARBAT & F.R. KHOEL. 2014. Seed priming techniques may improve grain and oil yields of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *The Journal of Animal & Plant Sciences* 24(6): 1863-1868.
- KRAWIEC, M., A. DZIWULSKA-HUNEK, K. KORNARZYNSKIAND & S. PALONKA. 2012. Wpływ wybranych czynników fizycznych na kiełkowanie nasion rzodkiewki (*Raphanus sativus* L.). *Acta Agrophysica (in poland)* 19(4): 737-748.
- KUMAR, G. & P. SRIVASTAVA. 2010. Comparative radiocytological effect of gamma rays and laser rays on safflower. *Romanian Journal of Biology Plant Biology* 55(2): 105-111.
- KUMAR, G., P. SRIVASTAVA, J.K. PANDEY & R. GOPAL. 2010. Effect of Laser-Irradiation on Photosynthetic Efficiency of Safflower Leaves. *Journal of Phytology* 2(4): 13-16.
- LEVSKAYA, A., O.D. WEINER, W.A. LIM, & C.A. VOIGT. 2009. Spatiotemporal control of cell signalling using a light-switchable protein interaction. *Nature* 461(7266): 997-1001.
- LI, J., X. GUO, Y. ZHANG, G. GE, Y. WANG, Y. HOU & J. PENG. 2013. Influence of He-Ne Laser Pretreatment on Physiological Characteristics in Wheat Seedlings under Cadmium Stress. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* 12: 017.
- MAAMOUN, M.K.M., M.E. EL-MAHROUK, Y.H. DEWIR & S.A. OMRAN. 2014. Effect of radiation and chemical mutagens on seeds germination of black cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Agricultural Technology* 10(5): 1183-1199.
- MATHEWS, M.A., B.J. PAI & S. BENEDICENTI. 2015. Effect of photobiomodulation on osseointegration and bone –A review. *Journal of Laser Applications* 27(1): 012003.
- METWALLY, S.A., M. ABOU-ELLAIL, B.H. ABO-LEILA & K.A. ABOUD. 2013. Effect of laser radiation on the growth, anatomical and biochemical genetic markers of *Celosia argentea* plants. *International Journal of Academic Research* 5(3): 200-205.
- METWALLY, S.A., S.L.M. MOHAMED, B.H. ABOU-LEILA & M.S. ALY. 2014. Effect of drought stress and helium neon (He-Ne) laser rays on growth, oil yield and fatty acids content in Caster bean (*Ricinus communis* L.). *Agriculture, Forestry and Fisheries* 3(3): 203-208.
- MICHTCHENKO, A. & V.M. HERNÁNDEZ. 2010. Photobiostimulation of germination and early growth of wheat seeds (*Triticum aestivum* L.) by a 980 nm semiconductor laser. *Revista Cubana de Física* 27: 271-274.
- MOHAMMADI, S., F. SHEKARI, R. FOTOVAT & A. DARUDI. 2012. Effect of laser priming on canola yield and its components under salt stress. *International Agrophysics* 26(1): 45-51.
- MUSZYŃSKI, S. & B. GLADYSZEWSKA. 2008. Representation of He-Ne laser irradiation effect on radish seeds with selected

- germination indices. *International Agrophysics* 22: 151-157.
- MUTHUSAMY, A., P.P. KUDWA, V. PRABHU, K.K. MAHATO, V.S. BABU, M.R. RAO, M.G. PUTHIYA & K. SATYAMOORTHY. 2012. Influence of Helium-Neon Laser Irradiation on Seed Germination In Vitro and Physico-Biochemical Characters in Seedlings of Brinjal (*Solanum melongena* L.) var. Mattu Gulla. *Photochemistry and Photobiology* 88(5): 1227-1235.
- NASIM, H. & Y. JAMIL. 2013. Recent advancements in spectroscopy using tunable diode lasers. *Laser Physics Letters* 10(4): 043001.
- NASIM, H. & Y. JAMIL. 2014. Diode lasers: From laboratory to industry. *Optics & Laser Technology* 56: 211-222.
- OSMAN, Y.A.H., K.M.K. EL-TOBGY & E.S.A. EL-SHERBINI. 2009. Effect of laser radiation treatments on growth, yield and chemical constituents of fennel and coriander plants. *Journal of Applied Sciences. Research* 5: 244-252.
- OUF, S.A., & N.F. ABDEL-HADY. 1999. Influence of He-Ne Laser Irradiation of Soybean seeds on seed mycoflora, growth, nodulation, and resistance to *Fusarium solani*. *Folia Microbiologica* 44: 388-396.
- PALEG, L.G. & D.D. ASPINALL. 1970. Field control of plant growth and development through the laser activation of phytochrome. *Nature* 5275: 970-973.
- PALEG, L.G. & D. ASPINALL. 1977. Control of flowering in chrysanthemum with a helium-neon laser. *Acta Horticulturae (ISHS)* 68: 69-74.
- PÉREZ-REYES, M.C., C. HERNÁNDEZ-AGUILAR, F.A. DOMÍNGUEZ-PACHECO, A. CRUZ-OREA & E. MORENO-MARTÍNEZ. 2015. The optical absorption coefficient of barley seeds investigated by photoacoustic spectroscopy and their effects of biostimulation laser. *International Journal Thermophysics* 36: 2389-2400.
- PERVEEN, R., Q. ALI, M. ASHRAF, F. AL-QURAINY, Y. JAMIL & M. RAZA AHMAD. 2010. Effects of different doses of low power continuous wave He-Ne laser radiation on some seed thermodynamic and germination parameters, and potential enzymes involved in seed germination of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Photochemistry and Photobiology* 86(5): 1050-1055.
- PERVEEN, R., Y. JAMIL, M. ASHRAF, Q. ALI, M. IQBAL & M.R. AHMAD. 2011. He-Ne Laser-Induced Improvement in Biochemical, Physiological, Growth and Yield Characteristics in Sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Photochemistry and Photobiology* 87(6): 1453-1463.
- PITTELKOW, C.M., X. LIANG, B.A. LINQUIST, K.J. VAN GROENIGEN, J. LEE, M.E. LUNDY, N. VAN GESTEL, J. SIX, R.T. VENTEREA & C. VAN KESSEL. 2015. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature* 517(7534): 365-368.
- PODLEŚNY, J. 2007. Effect of laser light on morphological features formation and faba bean yielding. *Pamiętnik Pulawski* 144: 115-129.
- PODLEŚNY, J., A. STOCHMAL, A. PODLEŚNA & L.E. MISIAK. 2012. Effect of laser light treatment on some biochemical and physiological processes in seeds and seedlings of white lupine and faba bean. *Plant Growth Regulation* 67(3): 227-233.
- POPOV, A.Y., N.A. POPOVA & A.V. TYURIN. 2007. A physical model of the action of low-intensity laser radiation on biological objects. *Optics and Spectroscopy* 103(4): 671-677.
- PROŚBA-BIALCZYK, U., H. SZAJSNER, E. GRZYŚ, A. DEMCZUK, E. SACALA & K. BĄK. 2013. Effect of seed stimulation on germination and sugar beet yield. *International Agrophysics* 27(2): 195-201.
- PROŚBA-BIALCZYK, U., H. SZAJSNER, E. GRZYŚ, A. DEMCZUK, E. SACALA & K. BĄK. 2011. Effect of seeds stimulation on sugar beet productivity. *Listy Cukrovarnicke a Reparske* 127(11): 344-347.
- QI, Z., YUE, M., HAN, R., & WANG, X. L. 2002. The Damage Repair Role of He-Ne Laser on Plants Exposed to Different Intensities of Ultraviolet B Radiation. *Photochemistry and Photobiology* 75(6): 680-686.
- QIU, Z.B., X.J. ZHU, F.M. LI, X. LIU & M. YUE. 2007. The optical effect of a semiconductor laser on protecting wheat from UV-B radiation damage. *Photochemical & Photobiological Sciences* 6(7): 788-793.
- QIU, Z.B., X. LIU, X.J. TIAN, & M. YUE. 2008a. Influence of He-Ne laser irradiation on protective enzyme activities and lipid peroxidation in wheat seedlings by drought stress damage. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* 32(5): 1002-1006.
- QIU, Z.B., F.M. LI, F. WANG & M. YUE. 2008b. Effects of CO<sub>2</sub> Laser on Glutathione-dependent Antioxidative System in Wheat Seedling under Drought Stress. *Journal of Wuhan Botanical Research* 26(4): 402-406.
- QIU, Z.B., J.T. LI, M.M. ZHANG, Z.Z. BI & Z.L. LI. 2013. He-Ne laser pretreatment protects wheat seedlings against cadmium-induced oxidative stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 88: 135-141.
- RASSAM, Y.Z., 2010. The Effect of Laser Light on Virulence Factors and Antibiotic Susceptibility of Locally Isolated *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Applied Sciences Research* 6: 1298-1302.
- RASSAM, Y.Z., A.F BOYA & F.A.A. MASHHADANI. 2012. Laser treatment may enhance growth and resistance to fungal infection of hard wheat Seeds. *Middle East Journal of Agriculture Research* 1(1): 1-5.
- RASSAM, Y.Z., F.A.A. MASHHADANI & A.F BOYA. 2013. Laser treatment may enhance growth and resistance to fungal infection of hard wheat seed. *Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS)* 2(3): 47-51.
- RASOULI, Z., S.P. MOHAMMADI, F. SHEKARI & S. KHAN-MOHAMMADI. 2012. Effect of Laser Priming and Salinity Stress on Canola Characteristics Using ANN. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences* 12(10): 1395-1405.
- RIMAL, B., R.M. RANAIVOSON, K.P. CZARNECKA & J.W. DOBROWOLSKI. 2014. Laser Biotechnology for Enhanced Rooting and Shooting of *Salix viminalis* in Hydroponic Condition for Better Adaptation in Industrially Contaminated Land. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation* 2(5): 228-230.
- RITAMBHARA, S. & K. GIRJESH. 2013. Biostimulating effect of laser beam on the Cytomorphological aspects of *Lathyrus sativus* L. *Annals of Plant Sciences* 2(5): 141-148.
- RITAMBHARA, S. & K. GIRJESH. 2011. Comparative Effect of X-Rays and Laser Beam on the Genetic Architecture of *Lathyrus sativus* L. *International Journal of Genetics* 1(1): 01-04.

- RONG, H., W. XUNLING, Y. MING & Q. ZHI. 2001. The influence of He-Ne laser irradiation on the damage and repair of wheat seedling by enhanced UV-B radiation. *Acta Photonica Sinica* 30(10): 1182-1187.
- RYBIŃSKI, W. 2000. Influence of laser beams on the variability of traits in spring barley. *International Agrophysics* 14(2): 227-232.
- SACALA, E., A. DEMCZUK, E. GRZYŚ, U. PROŚBA-BIALCZYK & H. SZAJSNER. 2012. Impact of presowing laser irradiation of seeds on sugar beet properties. *International Agrophysics* 26(3): 295-300.
- SAGHAFI, S., R. PENJWEINI, K. BECKER, K.W. KRATKY & H.U. DODT. 2010. Investigating the effects of laser beams (532 and 660 nm) in annihilation of pistachio mould fungus using spectrophotometry analysis. *Journal of the European Optical Society-Rapid publications* 5: 100331-100338.
- SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ, G., C. HERNÁNDEZ-AGUILAR, F.A. DOMÍNGUEZ-PACHECO, A. CRUZ-OREA, M.C.J. PEREZ-REYES, & E.M. MARTÍNEZ. 2015. The Optical Absorption Coefficient of Bean Seeds Investigated Using Photoacoustic Spectroscopy. *International Journal of Thermophysics* 36: 835-843.
- SEMENOV, M.A. & P.R. SHEWRY. 2011. Modelling predicts that heat stress, not drought, will increase vulnerability of wheat in Europe. *Scientific Reports* 1, 66; DOI: 10.1038/srep00066.
- SEN-HE, Q.I.A.N., Y.A.N.G. CHAO-YING & W.E.I. MING. 2012. The effect of laser irradiation on seeds, vigor of three kinds of vegetables. *Journal of Anhui Polytechnic University* 1: 008.
- SHAN, H. & R. HAN. 2009. Effect of He-Ne laser and enhanced ultraviolet-B radiation on the activities of three polyphenol metabolism enzymes in wheat seedling [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 6: 025.
- SKOWROŃSKA, M. & T. FILIPEK. 2014. Life cycle assessment of fertilizers: a review. *International Agrophysics* 28(1): 101-110.
- ŚLIWKA, M. 2014. Assessment of impact of coherent light on resistance of plants growing in unfavourable environmental conditions. *Journal of Ecological Engineering* 15(2): 112-118.
- ŚLIWKA, M. & M. JAKUBIAK. 2009. The influence of the coherent light on change of trace elements concentration in plants tissues. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 40: 380-387.
- ŚLIWKA, M. & M. JAKUBIAK. 2010a. Application of Laser Biotechnology for More Efficient Phytoremediation of Biogenic Elements. *Ecological Chemistry and Engineering A*. 17(2-3): 297-303.
- ŚLIWKA, M. & M. JAKUBIAK. 2010b. Application of laser stimulation of some hydrophytes species for more efficient biogenic elements phytoremediation. *Proceedings of ECOpole* 4(1): 206-212.
- SMITH, H. 2000. Phytochromes and light signal perception by plants—an emerging synthesis. *Nature* 407(6804): 585-591.
- SOLIMAN, A. & M.A. HARITH. 2009. Effects of Laser Biostimulation on Germination of *Acacia farnesiana* (L.) Willd. XIII International Conference on Medicinal and Aromatic Plants 854: 41-50.
- SREĆKOVIĆ, M., R. VASIĆ, M. DUKIĆ, S. JEVIĆ & P. JOVANIĆ. 2014. The Influence of Diode and He-Ne Lasers On Corn and Wheat Seeds. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 4: 165-175.
- SZAJSNER, H. & P. BĄBELEWSKI. 2014. The Influence of Laser Beam and Auxins on Rooting of Leatherleaf Viburnum (*Viburnum rhytidophyllum* Hemsl.). Cuttings. *Journal of Horticultural Research* 22(1): 63-66.
- TIWARI, T.N., D. KAMAL, P. YADAV, & S.R. PRASAD. 2014. Influence of Infra-Red Radiation on Germination Efficiency, Seedling Growth, Vigour Index and Biochemical Constituents in Summer Mungbean (*Vigna radiata* L.), AISECT University Journal 3(5): 1-3.
- TOTH, M., I. KERPERT, L. KOZMA & L. KLUJBER. 1993. Influence of different wavelength laser lights on the carbohydrate metabolism in germinating maize seeds. *Acta Botanica Hungarica* 38: 421-430.
- TRNKA, M., R.P. RÖTTER, M. RUIZ-RAMOS, K.C. KERSEBAUM, J.E. OLESEN, Z. ŽALUD & M.A. SEMENOV. 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change* 4: 637-643.
- TRUCHLIŃSKI, J., R. KOPER & R. STARCZYŃSKA. 2002. Influence of pre-sowing red light radiation and nitragine dressing of chickling vetch seeds on the chemical composition of their yield. *International Agrophysics* 16(2): 147-150.
- VASILEVSKI, G. 2003. Perspectives of the application of biophysical methods in sustainable agriculture. *Bulgarian Journal Plant Physiology Special Issue*: 179-186.
- WANG, H., Q. FENG, M. ZHANG, C. YANG, W. SHA & B. LIU. 2010. Alteration of DNA methylation level and pattern in sorghum (*Sorghum bicolor* L.) pure-lines and inter-line F1 hybrids following low-dose laser irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 99(3): 150-153.
- WEI, L. & L. WEIKAI. 2009. The Effect of Simulated Microgravity and Laser Radiation on the Germination of Soybean Seed [J]. *Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University (Chinese version)* 1: 020.
- WILCZEK M., R. KOPER, M. CWINTAL & T. KORNILLOWICZ-KOWALSKA. 2004. Germination capacity and the health status of red clover seeds following laser treatment. *International Agrophysics* 18(3): 289-293.
- WILCZEK, M., R. KOPER, M. CWINTAL & T. KORNILLOWICZ-KOWALSKA. 2005a. Germination capacity and health status of alfalfa seeds after laser treatment. *International Agrophysics* 19: 85-89.
- WILCZEK, M., R. KOPER, M. CWINTAL & T. KORNILLOWICZ-KOWALSKA. 2005b. Germination capacity and health status of hybrid alfalfa seeds after laser treatment. *International Agrophysics* 19(3): 257-261.
- WILDE, W.H.A., W.H. PARR & D.W. McPEAK. 1969. Seeds bask in laser light. *Laser Focus* 5(23): 41-42.
- WU, J., X. GAO & S. ZHANG. 2007. Effect of laser pretreatment on germination and membrane lipid peroxidation of Chinese pine seeds under drought stress. *Frontiers of Biology in China* 2: 314-317.
- XIAO, L.I., C.H.E.N. HUI-ZE & H.A.N. RONG. 2012. Effects of He-Ne Laser Irradiation on the Seeds Germination and Seedling Growth of *Arabidopsis thaliana*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* 1: 027.
- YANG, L., R. HAN & Y. SUN. 2012. Damage repair effect of He-

- Ne laser on wheat exposed to enhanced ultraviolet-B Radiation. *Plant Physiology and Biochemistry* 57: 218-221
- YING, C. & Y.P. CHEN. 2010. Research trend on regulating effect of laser pretreatment on plant growth. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 18(5): 1125-1129.
- ZARE, N., S.A. SADAT NOORI, M. MORTAZAVIAN & S. MOHAMMAD. 2014. Effect of Laser Priming on accumulation of Free Proline in Spring Durum Wheat (*Triticum turgidum* L.) under Salinity Stress. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies* 5(2): 119-130.
- ZHANG, B., Z.Y. DUAN & M. YANG. 2011. Effects of He-Ne Laser on the Seeds of Germination of Old Wheat [J]. *Tianjin Agricultural Sciences* 2: 033.
- ZHANG, H., L. ZHANG, P. TIDEMAND-LICHTENBERG, P. BUCHHAVE, X. XU & Y. LI. 2011. Effect of laser and LED on enzymatic production of ceramide. *Photochemistry and Photobiology* 87(1): 131-136.
- ZHANG, J., X.H. WANG, J.H. HAO & R. HAN. 2008. Effects of He-Ne Laser on Sugar Metabolism of Wheat Seedling Exposed to Ultraviolet-B Radiation [J]. *Acta Laser Biology Sinica* 5: 005.
- ZHANG, M.Y.W.X.S. & S.C.H. RONG. 2011. Effects of He-Ne Laser and Enhanced Ultraviolet-B Radiation on the Isozymes Gene Expression of Wheat Seedlings. *Chinese Journal of Lasers* (5): 021.
- ZHENHU, J. & J. DUAN. 2013. Protecting effect of He-Ne laser on winter wheat from UV-B radiation damage by analyzing proteomic changes in leaves. *Advances in Bioscience and Biotechnology* 4: 823-829.

Recibido: 09.03.14

Aceptado: 30.11.15