

RADIACIÓN SINCROTRÓN: UN AVANCE PARA LA INNOVACIÓN EN BIOTECNOLOGÍA Y EL CULTIVO DE TEJIDOS VEGETALES

Dr. Luis Jesús Castillo-Pérez¹

Dr. René Loredo Portales²

Dr. Juan José Maldonado Miranda³

Dra. Candy Carranza Álvarez⁴

RESUMEN

La biodiversidad del planeta atraviesa una crisis sin precedentes caracterizada por la acelerada pérdida de especies vegetales en las últimas décadas. Ante esta situación, es urgente comenzar a establecer programas de conservación efectivos que aminoren dicha tendencia. La biotecnología vegetal, mediante técnicas como el cultivo de tejidos vegetales (CTV), ha contribuido significativamente al desarrollo de protocolos de micropropagación, posicionándose como una estrategia clave de conservación *ex situ*. Sin embargo, para hacer frente a la magnitud del problema, es necesario impulsar la investigación científica y el desarrollo de tecnologías avanzadas. En este contexto, las herramientas de vanguardia como la radiación sincrotrón han cobrado relevancia en el estudio y avance de la biotecnología vegetal. Esta revisión crítica presenta diversas investigaciones que integran el uso de la radiación sincrotrón, y se discuten las ventajas y desventajas de esta técnica, así como algunos de los avances que se han logrado en el campo de la biotecnología vegetal.

Synchrotron Radiation: a breakthrough for innovation in biotechnology and plant tissue culture

ABSTRACT

The planet's biodiversity is experiencing an unprecedented crisis characterized by the accelerated loss of plant species in recent decades. Given this situation, it is urgent to begin establishing effective conservation programs to slow this trend. Plant biotechnology, through techniques such as plant tissue

¹Bioquímico y Dr. en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Profesor Investigador de la Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca de la UASLP. jesus.perez@uaslp.mx.

²Dr. en Ciencias Químicas por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Profesor Investigador en la Estación Regional del Noroeste. Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México. rloredo@geologia.unam.mx

³Dr. en Administración Pública por la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Profesor de Tiempo Completo de la Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca de la UASLP. juan.maldonado@uaslp.mx

⁴Bioquímica y Dra. en Ciencias Químicas por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Profesora de Tiempo Completo de la Facultad de Estudios Profesionales Zona Huasteca de la UASLP. candy.carranza@uaslp.mx

culture (PTC), has significantly contributed to the development of micropropagation protocols, positioning itself as a key *ex situ* conservation strategy. However, to address the magnitude of the problem, it is necessary to promote scientific research and the development of advanced technologies. In this context, cutting-edge tools such as synchrotron radiation have gained relevance in the study and advancement of plant biotechnology. This critical review presents various investigations that integrate the use of synchrotron radiation, and discusses the advantages and disadvantages of this technique, as well as some of the advances that have been achieved in the field of plant biotechnology.

Palabras clave: sincrotrón, biotecnología, biodiversidad, conservación.

1.- Introducción

La biodiversidad del planeta enfrenta actualmente una reducción sin precedentes y muchas especies han desaparecido durante los últimos años, por lo que es necesario establecer programas de conservación que contribuyan a proteger la biodiversidad mundial (Forester *et al.*, 2022). En este contexto, la biotecnología vegetal a través del cultivo de tejidos vegetales (CTV) ha logrado contribuir de manera favorable con el establecimiento de protocolos de micropropagación *in vitro* como una técnica de conservación *ex situ* (Coelho *et al.*, 2020; Aladele *et al.*, 2022). Con el objetivo de potenciar los alcances de la biotecnología vegetal, y en general al avance científico en la mayoría de las áreas de la ciencia, el uso de radiación sincrotrón se ha vuelto una herramienta indispensable en los últimos años. En el caso específico del estudio de organismos animales y vegetales, la radiación sincrotrón permite develar los mecanismos por los cuales funciona su maquinaria bioquímica. Por ejemplo, Kato *et al.*, (2020) dilucidaron un mecanismo para el control del crecimiento de las plantas, con el cual se podrían diseñar nuevos cultivos resistentes a enfermedades, sequías o inundaciones.

Otras investigaciones biotecnológicas que han utilizado la radiación sincrotrón, son, por ejemplo, el Proyecto Genoma Humano, una colaboración académica que conjunta la biología con la física, ya que uno de sus objetivos es conocer a detalle la secuencia genómica que codifica las proteínas a partir de sus cristales (Gibbs, 2020), la aplicación de las ciencias biomédicas y la biología molecular para la comprensión de rutas bioquímicas de organismos complejos y microorganismos (Pearson y Mehrabi, 2020; Pelka, 2022), la comprensión en la composición bioquímica de biopelículas patógenas, lo cual tiene aplicaciones importantes en el diagnóstico, tratamiento y control de infecciones persistentes causadas por microorganismos para el ser humano (Cheeseman *et al.*, 2021) y el estudio de los procesos fisiológicos en plantas y animales (Boer *et al.*, 2014; Ruffer *et al.*, 2024).

En lo que respecta a la fisiología vegetal, la radiación sincrotrón ha contribuido en la actualidad a comprender el mecanismo de acción de las hormonas reguladoras del crecimiento vegetal (PGR, por sus siglas en inglés) como las auxinas, las citocininas, las giberelinas y el etileno. Estas hormonas, son ampliamente utilizadas para procesos de micropropagación de especies vegetales con fines de conservación, pero poco estudiadas a nivel intracelular y genético (Türker-Kaya y Huck, 2017; Marmioli

et al., 2022). Debido a que el CTV implica el estudio de las respuestas morfogénicas de las células vegetales, a través del uso de PGR, resulta interesante poder conocer las aplicaciones de luz sincrotrón en beneficio del desarrollo de nuevas investigaciones que aporten al conocimiento bioquímico y fisiológico de las plantas. Por ello, el objetivo de la presente investigación fue realizar un análisis cualitativo de la bibliografía para evidenciar la relación e importancia que existe entre la radiación sincrotrón y el CTV como herramienta biotecnológica en los últimos años.

3.- Metodología

Se realizó una revisión bibliográfica en la cual se utilizó un sistema de agrupación de la información denominado “clasificación por especialización” en el cual se incluyeron las bases de datos como Google académico y PubMed. Estos sitios web poseen la ventaja de ligar sus búsquedas a la mayoría de las bases de datos de documentos científicos en todo el mundo. La búsqueda se realizó sin filtros de antigüedad y se registraron las investigaciones que relacionaran la biotecnología en general, con el uso de la radiación sincrotrón. La búsqueda en estas plataformas se realizó con los términos “synchrotron radiation biotechnology, synchrotron plant tissue culture y synchrotron phytohormones”, y sus homónimos en el idioma español, ya que tampoco hubo restricción de idioma. Posterior a ello, se agrupó la información y se registraron, además de los autores y el título de la investigación, el nombre del sincrotrón en el que fue realizada la investigación y el país donde este se localiza, con el objetivo de evidenciar las regiones en el mundo en donde el uso de la radiación sincrotrón se relaciona más con la biotecnología y el CTV.

4.- Resultados

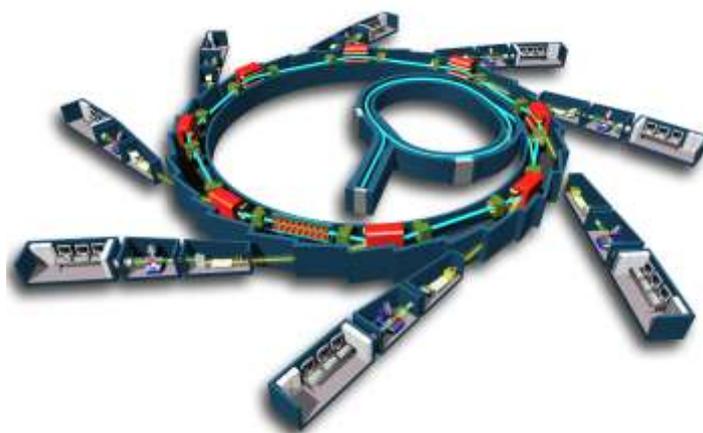
La radiación es uno de los recursos más utilizados por todas las ciencias experimentales que existen. La medicina, la física, la química y la biología son un ejemplo de las ciencias en donde se han realizado importantes avances gracias al uso de la radiación. Sin embargo, la radiación que produce un sincrotrón es mucho más intensa que la que se produce con los equipos de los laboratorios convencionales y además del espectro visible, cubre un rango continuo entre el infrarrojo y los rayos X, lo que le confiere propiedades como alta brillantez, extrema colimación y polarización, que permiten su aplicación en el estudio de la materia a nivel molecular y subatómico (Reed, 2011; Janssen *et al.*, 2023).

Un sincrotrón es un acelerador de partículas cargadas (electrones), que se desplazan a velocidades cercanas a la de la luz y que poseen energías del orden de los GeV (giga electronvoltios). La generación de esta luz se remonta a 1947, cuando un grupo de físicos teóricos intentaba mantener electrones en movimiento a una velocidad de 70 MeV. El propósito de este experimento era coordinar los electrones con distintas energías para que los más lentos recibieran un impulso adicional, mientras que los más

rápidos experimentarían una desaceleración. Como resultado de la aceleración de los electrones, durante el experimento, se producía una luz intensa que en un inicio se consideró un problema que resolver (Gutiérrez *et al.*, 2004). En síntesis, lo que hace un sincrotrón es acelerar electrones hasta velocidades muy cercanas a las de la luz e inyectarlas a un anillo de almacenamiento enorme. El interior de este anillo posee un gran vacío que alcanza presiones del orden de 10^{-10} milibares y que se encuentra rodeado por una pared de materiales muy resistentes, como el hormigón, con varias aberturas por las que sale la luz sincrotrón, la cual es dirigida a los sitios experimentales que funcionan como laboratorios y que se encuentran situados alrededor del anillo sincrotrónico (Fig. 1).

Fig. 1.

Esquema general de un sincrotrón.



Cortesía de EPSIM 3D/JF Santarelli, Synchrotron Soleil.

En lo que respecta al análisis de la información disponible, se evidenció la aplicación que tiene la radiación sincrotrón en el estudio de los procesos biotecnológicos con el registro de al menos 29 investigaciones en las cuales se empleó la radiación sincrotrón para desarrollar diversos proyectos relacionados con la biotecnología vegetal (Tabla 1). En esta sección se pudo observar que el 38% de las investigaciones se encuentran relacionadas con el estudio del comportamiento de elementos químicos, en su mayoría metales en organismos vegetales. Por otro lado, el 34.5% se relaciona con las ciencias biomédicas y su beneficio para el ser humano. Otro 24% se concentran en el estudio y análisis de procesos químico-biológicos en plantas, y solo se registró una investigación (3.5%) que se enfocó en estudiar un tema relacionado con el área de los alimentos.

Tabla 1.

Investigaciones que relacionan la biotecnología en un panorama general con el uso de radiación sincrotrón.

País de procedencia	Sincrotrón utilizado	Objetivo del estudio	Referencia
	Angströmquelle Karlsruhe Synchrotron	Investigar la acumulación de arsénico (As) en las raíces de <i>Zea mays</i> (maíz) y <i>Helianthus annuus</i> (girasol) mediante imágenes de micro-fluorescencia de rayos X (μ -XRF) con sincrotrón.	Neidhardt <i>et al.</i> 2015
Alemania	Deutsches Elektronen-Synchrotron	Analizar la organización lamelar de pigmentos en clorosomas para comprender los complejos captadores de luz en bacterias fotosintéticas verdes.	Pšenčík <i>et al.</i> , 2004
		Comprender el papel del Zn y el Cd en la defensa antiviral de <i>Noccaea caerulescens</i> infectadas con el Turnip yellow mosaic virus mediante la tomografía μ -XRF de sincrotrón.	Morina <i>et al.</i> 2023
		Determinar la distribución espacial del As en raíces hidratadas y frescas de caupí (<i>Vigna unguiculata</i>).	Kopittke <i>et al.</i> 2012
Australia	Australian Synchrotron	Determinar la absorción y la transformación del Zn en diversos tejidos del caupí (<i>Vigna unguiculata</i>) expuestos a nanopartículas de ZnO o ZnCl ₂ tras su crecimiento en solución o en suelo.	Wang <i>et al.</i> 2013
		Cuantificar los cambios espaciales y temporales de múltiples elementos químicos en hojas vivas, mediante	Blamey <i>et al.</i> , 2018

microfluorescencia de rayos X en
sincrotrón (μ -XRF).

Brasil	National Synchrotron Light Laboratory	Analizar el efecto de las auxinas en la fitoextracción de Pb de suelos contaminados.	Salazar <i>et al.</i> , 2016
	Shanghai Synchrotron Radiation Facility	Demostrar la reparación de tejido óseo <i>in vivo</i> mediante la fabricación de un andamio bioactivo de nano fosfato de magnesio (nMP) compuesto de proteína de trigo.	Xia <i>et al.</i> , 2016
	National Synchrotron Radiation Research Center / Beijing Synchrotron Radiation Facility	Dilucidar la distribución y especiación del Cu en <i>Lolium multiflorum</i> , tanto en ausencia como en presencia del quelante biodegradable ácido [S,S']-etilendiamino disuccínico (EDDS).	Zhao <i>et al.</i> , 2018
China	National Synchrotron Radiation Research Center	Analizar el crecimiento y capacidad de fitorremediación de <i>Miscanthus floridulus</i> y <i>Stenoloma chusanum</i> a través de microfluorescencia de rayos X (μ -XRF) basada en sincrotrón.	Cui <i>et al.</i> , 2020
	Beijing Synchrotron Radiation Facility	Investigar los efectos de los fertilizantes de azufre (Na_2SO_4) en la translocación y biotransformación del Cu en plantas de arroz utilizando múltiples técnicas basadas en el sincrotrón.	Sun <i>et al.</i> , 2017
	Shanghai Synchrotron Radiation Facility	Investigar los cambios químicos y espaciotemporales en granos de maíz dañados incrementalmente inducidos por la infección de <i>Aspergillus flavus</i> a nivel macroscópico y microscópico.	Lu <i>et al.</i> , 2022

	Beijing Synchrotron Radiation Facility	Evaluar la fitotoxicidad del nano polietileno tereftalato (nPET) y el micro polietileno tereftalato (mPET) mediante metabolómica no dirigida con SRXRF y algoritmos de aprendizaje profundo.	Xie <i>et al.</i> , 2024
Corea del Sur	Pohang Light Source	Analizar el uso de bacterias reductoras de metales para la biorremediación de suelos impactados con contaminantes orgánicos e inorgánicos mixtos.	Lee <i>et al.</i> , 2011
España	ALBA Synchrotron	Caracterizar los principales cambios en las biomoléculas causados por la exposición a Cd y el Hg en la microalga verde modelo <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> .	Barón <i>et al.</i> , 2021
		Determinar la estructura cristalina de la estreptavidina a partir de la difracción de múltiples longitudes de onda.	Hendricksont <i>et al.</i> , 1989
	Stanford Synchrotron Radiation Laboratory	Localizar la acumulación de Pb en tejidos de <i>Sedum alfredii</i> desarrollada en soluciones con Pb(NO ₃) ₂ .	Tian <i>et al.</i> , 2011
Estados Unidos de América		Analizar los patrones de distribución y especiación del Cu en raíces de arroz desarrolladas en 50 µM de Cu.	Lu <i>et al.</i> , 2017
	National Synchrotron Light Source	Desarrollar un nuevo enfoque para el estudio de la estructura y función de los ácidos nucleicos utilizando rayos X de radiación sincrotrón con resolución temporal.	Sclavi <i>et al.</i> , 1997
		Contribuir al proyecto para conocer el genoma humano analizando	Burley <i>et al.</i> , 1999

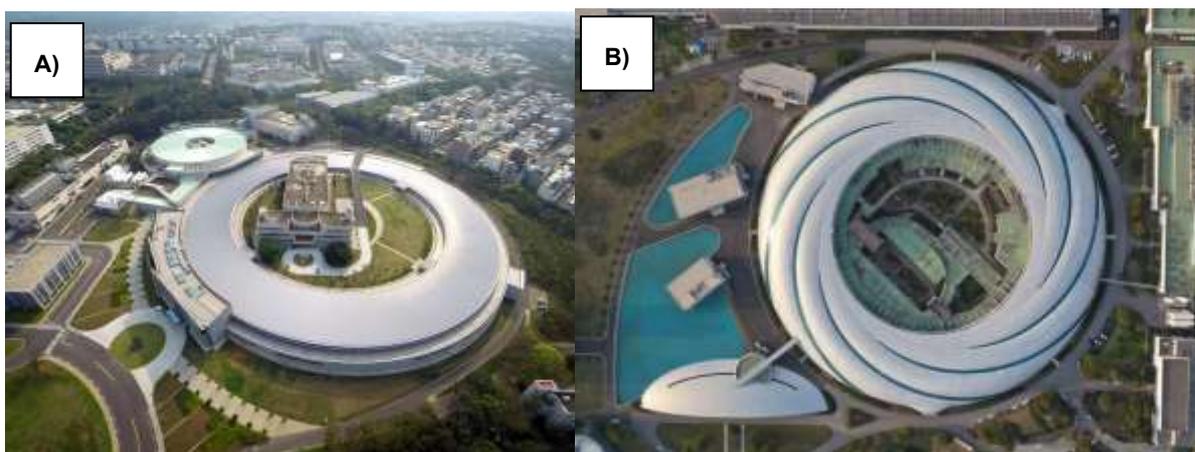
		cristalografía de proteínas mediante rayos X de radiación sincrotrón.	
Francia	European Synchrotron Radiation Facility	Contribuir en el procedimiento para la primera angiografía coronaria transvenosa humana utilizando la microscopía de rayos X con sincrotrón.	Elleaume <i>et al.</i> , 2000
		Analizar el uso de la microtomografía de radiación sincrotrón para el análisis de la microarquitectura tridimensional y el grado de mineralización de muestras de biopsia de cresta ilíaca humana.	Nuzzo <i>et al.</i> , 2002
		Contribuir al estudio de la permeabilidad de la barrera hematoencefálica y del volumen sanguíneo, mediante una tomografía computarizada de radiación sincrotrón cuantitativa.	Adam <i>et al.</i> , 2005
		Comprender la estructura cristalina del receptor acoplado a proteína G adrenérgica $\beta 2$ humana.	Rasmussen <i>et al.</i> , 2007
		Analizar la transferencia de enzimas activas de carbohidratos de bacterias marinas a la microbiota intestinal japonesa.	Hehemann <i>et al.</i> , 2010
		Caracterizar la distribución de Cd y de nutrientes (en particular Cu, Fe, Mn, P, S y Zn) en el grano de trigo duro, utilizando la espectrometría de masas de acoplamiento inductivo por ablación láser y μ -XRF de sincrotrón.	Yan <i>et al.</i> , 2020

		<p>Cuantificar la absorción de nanoplasticos y su translocación a brotes vegetales visualizando los nanoplasticos en las raíces mediante microfluorescencia de rayos X de sincrotrón (μ-XRF).</p>	<p>Del Real <i>et al.</i>, 2022</p>
Japón	Spring-8	<p>Analizar el uso de la espectroscopía de dicroísmo circular de radiación sincrotrón de proteínas para su aplicación en genómica estructural y funcional.</p>	<p>Miles <i>et al.</i>, 2006</p>
Inglaterra	Diamond Light Source	<p>Analizar la estructura proteica y la estabilidad de los sistemas proteína-nanopartícula utilizando dicroísmo circular de radiación de sincrotrón.</p>	<p>Laera <i>et al.</i>, 2011</p>

De acuerdo con la información recolectada, para el estudio de la biotecnología en general, los sincrotrones de China son los más utilizados (Figura 2), seguidos de los sincrotrones localizados en Francia y Estados Unidos. Cabe resaltar que, Brasil es el único país que figura de América Latina, ya que es el único sincrotrón disponible para esta región. En este sentido, es importante comentar que durante el sexenio 2012-2018 existió la propuesta en México de crear un Sincrotrón, el cual sería instalado en el estado de Morelos. Sin embargo, al cambio de gobierno, la propuesta se vino abajo y se abandonó el proyecto (Del Río-Bello, 2018). La propuesta del sincrotrón mexicano dejó como producto el establecimiento de una asociación formada por un grupo de científicos mexicanos, que comenzó establecida como una Red Temática de Usuarios de Luz Sincrotrón (REDTULS) apoyada por el CONAHCYT. Actualmente, también existe una agrupación de usuarios potenciales de luz sincrotrón, denominada Sociedad Mexicana de Luz Sincrotrón.

Figura 2.

- A) Vista aérea del National Synchrotron Radiation Research Center. Fotografía cortesía de Chang.ms
- B) Vista aérea del Beijing Synchrotron Radiation Facility.



Fotografía cortesía de Shen chunchen/for China Daily.

Para las investigaciones que se enfocaron en estudiar especialmente procesos relacionados con la biotecnología vegetal registramos 12 trabajos (Tabla 2), quedaron excluidas las investigaciones que no mencionaban procesos enfocados en las plantas, ya que estos fueron abordados en la Tabla 1. Para esta sección, el Sincrotrón más utilizado fue el National Synchrotron Light Source ubicado en los Estados Unidos de América con un 58.33% del total de investigaciones, seguido del Brazilian Synchrotron Light Laboratory (Fig. 3). Interesantemente, con respecto a los procesos de biotecnología vegetal, el Sincrotrón de Brasil tiene una importante participación debido a que en Sudamérica la biotecnología vegetal es una herramienta útil para el desarrollo de la agricultura.

Tabla 2.

Investigaciones que relacionan de forma específica la biotecnología vegetal con el uso de la radiación sincrotrón.

País de procedencia	Sincrotrón utilizado	Objetivo del estudio	Referencia
Brasil	Brazilian Synchrotron Light Laboratory	Absorción radicular y reducción del cromo hexavalente por macrófitos acuáticos evaluadas mediante emisión de rayos X de alta resolución.	Espinoza <i>et al.</i> , 2009
		Las interacciones entre el ácido indol-3-acético (IAA) y una lectina de semillas de <i>Canavalia maritima</i> revelan una nueva	Delatorre <i>et al.</i> , 2013

función de las lectinas en la fisiología vegetal.

Canada	Canadian Light Source/ Centre Canadien de Rayonnement Synchrotron	La radiación sincrotrón arroja nueva luz sobre la investigación vegetal: El uso de potentes técnicas para estudiar la estructura y composición de las plantas.	Vijayan <i>et al.</i> , 2015
España	ALBA Synchrotron	Bases estructurales de la especificidad de unión al ADN de los factores de transcripción ARF dependientes de auxina.	Boer <i>et al.</i> , 2014
	Lawrence Berkeley National Laboratory	Visualización de la química de la rizosfera de las leguminosas con radiación sincrotrón en el infrarrojo medio.	Raab y Martin, 2001
	Stanford Synchrotron Radiation Laboratory	Ingeniería de tolerancia e hiperacumulación de arsénico en plantas combinando la expresión de arsenato reductasa y gamma-glutamilcisteína sintetasa.	Dhankher <i>et al.</i> , 2002
Estados Unidos de América		Imágenes químicas de microestructuras de tejidos vegetales dentro de la dimensión celular mediante microespectroscopia infrarroja de sincrotrón.	Yu <i>et al.</i> , 2003
	National Synchrotron Light Source	Evolución de la lignificación del xilema y regulación del transporte de hidrogeles.	Boyce <i>et al.</i> , 2004
		Microespectroscopia infrarroja por transformada de fourier con sincrotrón: Una nueva herramienta para vigilar el destino de los contaminantes orgánicos en las plantas.	Dokken <i>et al.</i> , 2005a

		Uso de la microespectroscopia infrarroja en el crecimiento y desarrollo de las plantas.	Dokken <i>et al.</i> , 2005b
		Mecanismo molecular del reconocimiento de la histona H3K4me3 por el homeodominio vegetal.	Peña <i>et al.</i> , 2006
Inglaterra	Synchrotron Radiation Source	Estudio de la fluorescencia clorofílica de Clematis madura y micropropagada mediante espectroscopia con resolución temporal.	Lees <i>et al.</i> , 1991

Fig. 3.

Vista aérea del Brazilian Synchrotron Light Laboratory, única fuente de luz sincrotrón en América Latina.



Fuente: <https://lightsources.org/lightsources-of-the-world/americas/brazilian-synchrotron-light-laboratory/>

En este sentido, es importante comentar que la Sociedad Mexicana de Luz Sincrotrón cuenta en algunos momentos con convocatorias en las cuales se apoya a estudiantes interesados en realizar alguna parte metodológica de sus investigaciones con una estancia en alguno de los sincrotrones del mundo, incluido el sincrotrón brasileño. Para ello, es necesario afiliarse como miembro estudiante de la Sociedad. Los invitamos a consultar su sitio web (<https://www.smls.mx/>) para obtener más información acerca de este y otros beneficios que se pueden adquirir al ser miembros activos de la sociedad.

En la Tabla 2 se observa que países como Inglaterra, España y Canadá también han dirigido sus esfuerzos hacia la investigación en biotecnología vegetal. Cabe destacar que el National Synchrotron Light Source, ubicado en Estados Unidos, es el sincrotrón más utilizado en el continente americano. Un análisis detallado de la distribución de la investigación en este campo revela una notable concentración en ciertos centros de radiación sincrotrón, resaltando la prominencia del mencionado laboratorio estadounidense. No obstante, también se identifican avances significativos en Brasil, donde el Brazilian Synchrotron Light Laboratory se posiciona como un actor relevante en la región. Esta distribución geográfica resalta la importancia de impulsar y aprovechar el potencial de la biotecnología vegetal en diversas regiones del mundo, especialmente en América Latina, donde su aplicación puede ser clave para el desarrollo agrícola sostenible. Asimismo, se pone de manifiesto la necesidad de fortalecer la colaboración internacional y el intercambio de conocimientos para fomentar el progreso de este campo en constante evolución.

El uso de la luz sincrotrón ofrece ventajas significativas para el análisis a nivel molecular y estructural en diversas áreas de la ciencia. Sin embargo, esta tecnología implica altos costos asociados tanto a su construcción, como a su operación y mantenimiento. La infraestructura necesaria para albergar un sincrotrón es compleja, demanda inversiones multimillonarias, personal altamente capacitado y un entorno tecnológico avanzado, lo cual representa un gran desafío para países en desarrollo y con recursos limitados. En el caso de México, estas exigencias han dificultado el establecimiento de un centro nacional de luz sincrotrón, lo que limita el acceso de la comunidad científica a esta herramienta de vanguardia. Actualmente, los investigadores mexicanos deben recurrir a instalaciones en el extranjero, lo que implica tiempos prolongados de espera, mayores costos logísticos y barreras administrativas, reduciendo así las oportunidades de aprovechar plenamente el potencial de esta tecnología para el desarrollo científico y tecnológico del país.

6.- Conclusión

En México actualmente se desarrollan diversas investigaciones sobre el cultivo de tejidos vegetales, utilizando la micropropagación como técnica para apoyar los procesos de conservación. Es de vital importancia dar a conocer las facilidades que brinda una herramienta como el Sincrotrón para la investigación de procesos fisiológicos en plantas y considerar que la utilización de este tipo de luz podría proporcionar resultados para acelerar los procesos de propagación, dilucidar procesos de protección fisiológica en plantas y comprender mecanismos vegetales que proporcionarían grandes ventajas en diversos mecanismos bioquímicos.

7.- Referencias bibliográficas

Adam, J. F., Nemoz, C., Bravin, A., Fiedler, S., Bayat, S., Monfraix, S., Berruyer, G., Charvet, A. M., Le Bas, J. F., Elleaume, H., & Estève, F. (2005). High-resolution blood–brain barrier permeability

- and blood volume imaging using quantitative synchrotron radiation computed tomography: study on an F98 rat brain glioma. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 25(2), 145-153.
- Aladele, S. E., Afolayan, G., Jamaledine, Z. O., Oduoye, O. T., Bolatito, O. A., Afolayan, A. O., Olosunde, A. A., Olubiyi, M. R., Okere, A. U., Daniel, I. O., & Ubi, B. E. (2022). Biotechnological approaches for genetic resources conservation and use. In *Agricultural Biotechnology, Biodiversity and Bioresources Conservation and Utilization* (pp. 427-450). *CRC Press*.
- Barón-Solá, Á., Toledo-Basantés, M., Arana-Gandía, M., Martínez, F. G., Ortega-Villasante, C., Dučić, T., Yousef, I., & Hernández, L. E. (2021). Synchrotron Radiation-Fourier Transformed Infrared microspectroscopy (MSR-FTIR) reveals multiple metabolism alterations in microalgae induced by cadmium and mercury. *Journal of Hazardous Materials*, 419, 126502.
- Blamey, F. P. C., Paterson, D. L., Walsh, A., Afshar, N., McKenna, B. A., Cheng, M., Tang, C., Horst, W. J., Menzies, N. W., & Kopittke, P. M. (2018). Time-resolved x-ray fluorescence analysis of element distribution and concentration in living plants: an example using manganese toxicity in cowpea leaves. *Environmental and Experimental Botany*, 156, 151-160.
- Boer, D. R., Freire-Rios, A., van den Berg, W. A., Saaki, T., Manfield, I. W., Kepinski, S., López-Vidriero, I., Franco-Zorrilla, J. M., de Vries, S. C., Solano, R., Weijers, D., & Coll, M. (2014). Structural basis for DNA binding specificity by the auxin-dependent ARF transcription factors. *Cell*, 156(3), 577-589.
- Boyce, C. K., Zwieniecki, M. A., Cody, G. D., Jacobsen, C., Wirick, S., Knoll, A. H., & Holbrook, N. M. (2004). Evolution of xylem lignification and hydrogel transport regulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(50), 17555-17558.
- Burley, S. K., Almo, S. C., Bonanno, J. B., Capel, M., Chance, M. R., Gaasterland, T., Lin, D., Sali, A., Studier, F. W., & Swaminathan, S. (1999). Structural genomics: beyond the human genome project. *Nature genetics*, 23(2).
- Cheeseman, S., Shaw, Z. L., Vongsivut, J., Crawford, R. J., Dupont, M. F., Boyce, K. J., Gangadoo, S., Bryant, S. J., Bryant, G., Cozzolino, D., Chapman, J., Elbourne, A., & Truong, V. K. (2021). Analysis of pathogenic bacterial and yeast biofilms using the combination of synchrotron ATR-FTIR microspectroscopy and chemometric approaches. *Molecules*, 26(13), 3890.
- Coelho, N., Gonçalves, S., & Romano, A. (2020). Endemic plant species conservation: Biotechnological approaches. *Plants*, 9(3), 345.
- Cui, J., Zhao, Y., Chan, T., Zhang, L., Tsang, D. C., & Li, X. (2020). Spatial distribution and molecular speciation of copper in Indigenous plants from contaminated mine sites: implication for phytostabilization. *Journal of Hazardous Materials*, 381, 121208.
- Del Real, A. E. P., Mitrano, D. M., Castillo-Michel, H., Wazne, M., Reyes-Herrera, J., Bortel, E., Hesse, B., Villanova, J., & Sarret, G. (2022). Assessing implications of nanoplastics exposure to plants with advanced nanometrology techniques. *Journal of Hazardous Materials*, 430, 128356.
- Del Río-Bello (2018). Un asunto de estado: la construcción del primer sincrotrón en México. Consejo

de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos. Morelos, México.

- Delatorre, P., Silva-Filho, J. C., Rocha, B. A., Santi-Gadelha, T., da Nóbrega, R. B., Gadelha, C. A., do Nascimento, K. S., Nagano, C. S., Sampaio, A. H., & Cavada, B. S. (2013). Interactions between indole-3-acetic acid (IAA) with a lectin from *Canavalia maritima* seeds reveal a new function for lectins in plant physiology. *Biochimie*, 95(9), 1697-1703.
- Dhankher, O. P., Li, Y., Rosen, B. P., Shi, J., Salt, D., Senecoff, J. F., Sashti, N. A., & Meagher, R. B. (2002). Engineering tolerance and hyperaccumulation of arsenic in plants by combining arsenate reductase and [gamma]-glutamylcysteine synthetase expression. *Nature biotechnology*, 20(11), 1140.
- Dokken, K. M., Davis, L. C., & Marinkovic, N. S. (2005b). Use of infrared microspectroscopy in plant growth and development. *Applied Spectroscopy Reviews*, 40(4), 301-326.
- Dokken, K. M., Davis, L. C., Erickson, L. E., Castro-Diaz, S., & Marinkovic, N. S. (2005a). Synchrotron fourier transform infrared microspectroscopy: a new tool to monitor the fate of organic contaminants in plants. *Microchemical journal*, 81(1), 86-91.
- Elleaume, H., Fiedler, S., Estève, F., Bertrand, B., Charvet, A. M., Berkvens, P., Berruyer, G., Brochard, T., Le Duc, G., Nemoz, C., Renier, M., Suortti, P., Thomlinson, W., & Le Bas, J. F. (2000). First human transvenous coronary angiography at the European Synchrotron Radiation Facility. *Physics in medicine and biology*, 45(9), L39.
- Espinoza-Quiñones, F. R., Martin, N., Stutz, G., Tirao, G., Palácio, S. M., Rizzutto, M. A., Módenes, A. N., Silva, F. G., Jr, Szymanski, N., & Kroumov, A. D. (2009). Root uptake and reduction of hexavalent chromium by aquatic macrophytes as assessed by high-resolution X-ray emission. *Water research*, 43(17), 4159-4166.
- Forester, B. R., Beever, E. A., Darst, C., Szymanski, J., & Funk, W. C. (2022). Linking evolutionary potential to extinction risk: applications and future directions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20(9), 507-515.
- Gibbs, R. A. (2020). The human genome project changed everything. *Nature Reviews Genetics*, 21(10), 575-576.
- Gutiérrez, A., Martín-Gago, J. Á., & Salvador, F. (2004). La luz sincrotrón: una herramienta extraordinaria para la ciencia. *Apuntes de Ciencia y Tecnología*, 12, 37-46.
- Hehemann, J. H., Correc, G., Barbeyron, T., Helbert, W., Czejek, M., & Michel, G. (2010). Transfer of carbohydrate-active enzymes from marine bacteria to Japanese gut microbiota. *Nature*, 464(7290), 908-912.
- Hendrickson, W. A., Pähler, A., Smith, J. L., Satow, Y., Merritt, E. A., & Phizackerley, R. P. (1989). Crystal structure of core streptavidin determined from multiwavelength anomalous diffraction of synchrotron radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 86(7), 2190-2194.
- Janssen, S., El Shafie, R. A., Ruder, A. M., Buergy, D., Scafa, D., Giordano, F. A., Nicolay, N. H., Vogel,

- M. M. E., Combs, S. E., Fahlbusch, F. B., Rades, D. & Kaesmann, L. (2023). Mobile applications in radiation oncology—current choices and future potentials. *Strahlentherapie und Onkologie*, 199(4), 337-349.
- Kato, H., Mutte, S. K., Suzuki, H., Crespo, I., Das, S., Radoeva, T., Fontana, M., Yoshitake, Y., Hainiwa, E., van den Berg, W., Lindhoud, S., Ishizaki, K., Hohlbein, J., Borst, J. W., Boer, D. R., Nishihama, R., Kohchi, T., & Weijers, D. (2020). Design principles of a minimal auxin response system. *Nature Plants*, 6(5), 473-482.
- Kopittke, P. M., de Jonge, M. D., Menzies, N. W., Wang, P., Donner, E., McKenna, B. A., Paterson, D., Howard, D. L., & Lombi, E. (2012). Examination of the distribution of arsenic in hydrated and fresh cowpea roots using two- and three-dimensional techniques. *Plant physiology*, 159(3), 1149–1158.
- Laera, S., Ceccone, G., Rossi, F., Gilliland, D., Hussain, R., Siligardi, G., & Calzolari, L. (2011). Measuring protein structure and stability of protein–nanoparticle systems with synchrotron radiation circular dichroism. *Nano letters*, 11(10), 4480-4484.
- Lee, E. H., Kang, Y. S., & Cho, K. S. (2011). Bioremediation of diesel-contaminated soils by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation employing *Rhodococcus* sp. EH831. *Microbiology and Biotechnology Letters*, 39(1), 86-92.
- Lees, R. P., Evans, E. H., & Brown, R. G. (1991). A study of the chlorophyll fluorescence from mature and micropropagated Clematis by time-resolved spectroscopy. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 8(3), 307-313.
- Lu, L., Xie, R., Liu, T., Wang, H., Hou, D., Du, Y., He, Z., Yang, X., Sun, H., & Tian, S. (2017). Spatial imaging and speciation of CU in rice (*Oryza sativa* L.) roots using synchrotron-based X-ray microfluorescence and X-ray absorption spectroscopy. *Chemosphere*, 175, 356-364.
- Lu, Y., Jia, B., Yoon, S., Zhuang, H., Ni, X., Guo, B., Gold, S. E., Fountain, J. C., Glenn, A. E., Lawrence, K. C., Zhang, H., Guo, X., Zhang, F., & Wang, W. (2022). Spatio-temporal patterns of *Aspergillus flavus* infection and aflatoxin B1 biosynthesis on maize kernels probed by SWIR Hyperspectral Imaging and Synchrotron FTIR microspectroscopy. *Food Chemistry*, 382, 132340.
- Marmiroli, M., Mussi, F., Gallo, V., Gianoncelli, A., Hartley, W., & Marmiroli, N. (2022). Combination of Biochemical, Molecular, and Synchrotron-Radiation-Based Techniques to Study the Effects of Silicon in Tomato (*Solanum Lycopersicum* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 15837.
- Miles, A. J., & Wallace, B. A. (2006). Synchrotron radiation circular dichroism spectroscopy of proteins and applications in structural and functional genomics. *Chemical Society Reviews*, 35(1), 39-51.
- Morina, F., Mijovilovich, A., Mishra, A., Brückner, D., Vujić, Z., Bokhari, S. N. H., Špak, J., Falkenberg, G., & Küpper, H. (2023). Cadmium and ZN hyperaccumulation provide efficient constitutive

- defense against turnip yellow mosaic virus infection in *Noccaea caerulescens*. *Plant Science*, 336, 111864.
- Neidhardt, H., Kramar, U., Tang, X., Guo, H., & Norra, S. (2015). Arsenic accumulation in the roots of *Helianthus annuus* and *Zea mays* by irrigation with arsenic-rich groundwater: Insights from Synchrotron X-ray Fluorescence Imaging. *Geochemistry*, 75(2), 261-270.
- Nuzzo, S., Lafage-Proust, M. H., Martin-Badosa, E., Boivin, G., Thomas, T., Alexandre, C., & Peyrin, F. (2002). Synchrotron Radiation Microtomography Allows the Analysis of Three-Dimensional Microarchitecture and Degree of Mineralization of Human Iliac Crest Biopsy Specimens: Effects of Etidronate Treatment. *Journal of Bone and Mineral Research*, 17(8), 1372-1382.
- Pearson, A. R., & Mehrabi, P. (2020). Serial synchrotron crystallography for time-resolved structural biology. *Current Opinion in Structural Biology*, 65, 168-174.
- Pelka, J. B. (2022). Synchrotron Radiation in Biology and Medicine. *Acta Physica Polonica: A*, 114(2).
- Peña, P. V., Davrazou, F., Shi, X., Walter, K. L., Verkhusha, V. V., Gozani, O., Zhao, R., & Kutateladze, T. G. (2006). Molecular mechanism of histone H3K4me3 recognition by plant homeodomain of ING2. *Nature*, 442(7098), 100.
- Pšenčík, J., Ikonen, T. P., Laurinmäki, P., Merckel, M. C., Butcher, S. J., Serimaa, R. E., & Tuma, R. (2004). Lamellar organization of pigments in chlorosomes, the light harvesting complexes of green photosynthetic bacteria. *Biophysical journal*, 87(2), 1165-1172.
- Raab, T. K., & Martin, M. C. (2001). Visualizing rhizosphere chemistry of legumes with mid-infrared synchrotron radiation. *Planta*, 213(6), 881-887.
- Rasmussen, S. G., Choi, H. J., Rosenbaum, D. M., Kobilka, T. S., Thian, F. S., Edwards, P. C., Burghammer, M., Ratnala, V. R., Sanishvili, R., Fischetti, R. F., Schertler, G. F., Weis, W. I., & Kobilka, B. K. (2007). Crystal structure of the human [beta] 2 adrenergic G-protein-coupled receptor. *Nature*, 450(7168), 383.
- Reed, A. B. (2011). The history of radiation use in medicine. *Journal of vascular surgery*, 53(1), 3S-5S.
- Rüffer, B., Thielmann, Y., Lemke, M., Minges, A., & Groth, G. (2024). Crystallization of Ethylene Plant Hormone Receptor—Screening for Structure. *Biomolecules*, 14(3), 375.
- Salazar, M. J., Rodriguez, J. H., Cid, C. V., & Pignata, M. L. (2016). Auxin effects on Pb phytoextraction from polluted soils by *Tegetes minuta* L. and *Bidens pilosa* L.: Extractive power of their root exudates. *Journal of hazardous materials*, 311, 63-69.
- Sclavi, B., Woodson, S., Sullivan, M., Chance, M. R., & Brenowitz, M. (1997). Time-resolved synchrotron X-ray “footprinting”, a new approach to the study of nucleic acid structure and function: application to protein-DNA interactions and RNA folding. *Journal of molecular biology*, 266(1), 144-159.
- Sun, L., Yang, J., Fang, H., Xu, C., Peng, C., Huang, H., Lu, L., Duan, D., Zhang, X., & Shi, J. (2017). Mechanism Study of sulfur fertilization mediating copper translocation and biotransformation in rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Environmental Pollution*, 226, 426-434.

- Tian, S., Lu, L., Yang, X., Huang, H., Brown, P. H., Labavitch, J. M., Liao, H., & He, Z. (2011). The impact of EDTA on lead distribution and speciation in the accumulator *Sedum Alfredii* by Synchrotron X-ray investigation. *Environmental Pollution*, 159(3), 782-788.
- Türker-Kaya, S., & Huck, C. W. (2017). A Review of mid-infrared and near-infrared imaging: principles, concepts and applications in plant tissue analysis. *Molecules*, 22(1), 168.
- Vijayan, P., Willick, I. R., Lahlali, R., Karunakaran, C., & Tanino, K. K. (2015). Synchrotron radiation sheds fresh light on plant research: The use of powerful techniques to probe structure and composition of plants. *Plant and Cell Physiology*, 56(7), 1252-1263.
- Wang, P., Menzies, N. W., Lombi, E., McKenna, B. A., Johannessen, B., Glover, C. J., Kappen, P., & Kopittke, P. M. (2013). Fate of ZnO nanoparticles in soils and cowpea (*Vigna unguiculata*). *Environmental science & technology*, 47(23), 13822–13830.
- Xia, Y., Zhou, P., Wang, F., Qiu, C., Wang, P., Zhang, Y., Zhao, L., & Xu, S. (2016). Degradability, biocompatibility, and osteogenesis of biocomposite scaffolds containing nano magnesium phosphate and wheat protein both *in vitro* and *in vivo* for bone regeneration. *International journal of nanomedicine*, 11, 3435–3449.
- Xie, H., Wei, C., Wang, W., Chen, R., Cui, L., Wang, L., Chen, D., Yu, Y., Li, B., & Li, Y. F. (2024). Screening the phytotoxicity of micro/nanoplastics through non-targeted metallomics with synchrotron radiation x-ray fluorescence and deep learning: taking micro/nano polyethylene terephthalate as an example. *Journal of Hazardous Materials*, 463, 132886.
- Yan, B., Isaure, M., Mounicou, S., Castillo-Michel, H., De Nolf, W., Nguyen, C., & Cornu, J. (2020). Cadmium distribution in mature durum wheat grains using dissection, laser ablation-ICP-MS and synchrotron techniques. *Environmental Pollution*, 260, 113987.
- Yu, P., McKinnon, J. J., Christensen, C. R., Christensen, D. A., Marinkovic, N. S., & Miller, L. M. (2003). Chemical imaging of microstructures of plant tissues within cellular dimension using synchrotron infrared microspectroscopy. *Journal of agricultural and food chemistry*, 51(20), 6062-6067.
- Zhao, Y., Cui, J., Chan, T., Dong, J., Chen, D., & Li, X. (2018). Role of Chelant on Cu distribution and speciation in *lolium multiflorum* by synchrotron techniques. *Science of The Total Environment*, 621, 772-781.