

Sistema automatizado de control y monitoreo para la desinfección de semillas por luz UV-C

Nombre: Mario Rojas
Institución: Tecnológico de Monterrey
Email: mario.rojas@tec.mx
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8796-5662>

Nombre: Juana-Isabel Méndez
Institución: Tecnológico de Monterrey
Email: isabelmendez@tec.mx
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5337-2527>

Nombre: David C. Balderas
Institución: Tecnológico de Monterrey
Email: dc.balderassilva@tec.mx
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7630-8608>

Nombre: Claudia Hernández-Aguilar
Institución: Instituto Politécnico Nacional
Email: clauhaj@yahoo.com
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0952-1510>

Nombre: Arturo Domínguez-Pacheco
Institución: Instituto Politécnico Nacional
Email: fartur@hotmail.com
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3561-7257>

Nombre: Pedro Ponce
Institución: Tecnológico de Monterrey
Email: pedro.ponce@tec.mx
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7035-5286>

Resumen— La desinfección de semillas mediante luz ultravioleta en el rango UV-C ha sido ampliamente estudiada, y en la literatura existen diversos prototipos de cámaras de desinfección. Sin embargo, los sistemas convencionales suelen exponer las semillas a la radiación UV en longitudes de onda específicas y durante un tiempo determinado, sin monitorear variables clave como temperatura, humedad e intensidad de radiación dentro de la cámara. Contar con datos en tiempo real sobre estas variables permitiría optimizar el proceso de desinfección y mejorar los resultados de germinación. En este artículo se presenta el diseño e implementación de una cámara de desinfección de semillas con luz UV-C, integrada con un sistema de adquisición de datos y sensores de humedad, temperatura e intensidad de radiación. Además, el prototipo incorpora herramientas de visión por computadora para la captura de imágenes de las semillas y análisis colorimétrico. También, se propone una interfaz de control que permite ajustar el tiempo de desinfección, visualizar datos de sensores en tiempo real y generar reportes con el historial de valores registrados. Los resultados obtenidos demuestran que el prototipo produce cambios en las propiedades de las semillas de maíz y que los datos registrados por los sensores proporcionan información clave para comprender el proceso de radiación y optimizar su funcionamiento.

Palabras Clave — Desinfección, maíz, UV-C, automatización, control.

Abstract- The disinfection of seeds using ultraviolet (UV-C) light has been widely studied, with various disinfection chamber prototypes available in the literature. However, conventional disinfection systems typically expose seeds to UV light at specific wavelengths and for a predetermined duration without monitoring key environmental variables such as temperature, humidity, and radiation intensity inside the chamber. Real-time data on these variables could provide valuable insights for optimizing the disinfection process and improving germination outcomes. This paper presents the design and implementation of a UV-C seed disinfection chamber integrated with a data acquisition system and sensors for humidity, temperature, and radiation intensity. Additionally, the prototype incorporates computer vision tools for seed imaging and colorimetric analysis. A control interface is also proposed, allowing users to adjust disinfection time, visualize real-time sensor data, and generate process reports with historical sensor values. The results demonstrate that the prototype effectively induces changes in the properties of maize seeds, while the recorded sensor data provide essential information for understanding the radiation process and optimizing system performance.

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de preacondicionamiento (priming) en semillas ayudan a mejorar la productividad de los cultivos. Sin embargo, el uso de técnicas convencionales involucran el uso de pesticidas y otros métodos que no son amigables con el medio ambiente [1]. Es por ello que, se han propuesto alternativas más sostenibles para el tratamiento de semillas, entre ellas la aplicación de radiación ultravioleta (UV) que se destaca como una alternativa ecoamigable y rentable, ofreciendo múltiples beneficios en comparación con los métodos convencionales [2].

La radiación ultravioleta en el rango conocido como UV-C, que abarca longitudes de onda entre 200 y 280 nm, posee potentes efectos germicidas, ya que es capaz de alterar el material genético de microorganismos como bacterias, hongos y virus, impidiendo su reproducción [3]. Gracias a esta capacidad, se ha aplicado con éxito en dosis controladas al tratamiento de semillas, logrando no solo la eliminación de agentes patógenos y contaminantes superficiales, sino también la modificación de ciertas propiedades fisiológicas de germinación [1,2]. Esta técnica innovadora ha demostrado ser una alternativa eficaz y sostenible para mejorar la calidad y sanidad de las semillas, contribuyendo así a una producción agrícola más eficiente y libre de químicos agresivos [4].

Para llevar a cabo la desinfección con luz UV-C, es fundamental fabricar dispositivos o cámaras que generen esta radiación, ya que, a pesar de su alta energía y eficacia para eliminar microorganismos, no se encuentra de manera natural en la superficie terrestre debido a su absorción por la atmósfera. Se han utilizado arreglos de lámparas y cámaras con UV-C para desinfección efectiva de semillas sin dañarlas. Mahmood et al. [5] presentaron un diseño de caja cilíndrica (60cm de diámetro y 40cm de longitud) con fuente de radiación UV de 254 nm para investigar los sus efectos en la germinación y crecimiento de semillas de trigo. Araujo et al. [6] diseñaron una cámara cilíndrica de 46 cm de diámetro y 90 cm de largo, equipada con dos lámparas UV-C de 254 nm, para irradiar semillas de ricino y evaluar su impacto en la calidad fisiológica y sanitaria, ajustando la intensidad y el tiempo de exposición. Popović et al. [7] utilizaron una cámara industrial de tratamiento UV-C (3D UV-C chamber) con 12 lámparas de 32W para tratar semillas de maíz y trigo, reduciendo la contaminación por hongos y micotoxinas en los granos. Stefanello et al. [8] estudiaron el efecto de la radiación UV-B y UV-C en semillas de frijol de soya, utilizando una cámara de irradiación para evaluar cómo distintos tiempos de exposición afectan su germinación y el crecimiento de los brotes. Por su parte, investigadores del Instituto Politécnico Nacional (IPN) han desarrollado diversos prototipos de cámaras UV-C para la esterilización de semillas. Entre ellos destaca un sistema a gran escala, compuesto por una base cilíndrica de 131 cm de largo y 28 cm de diámetro, equipada con cuatro lámparas UV-C y un mecanismo rotatorio para garantizar una exposición uniforme de las semillas [9],[4].

Los estudios muestran que la radiación UV actúa como un agente de priming eficaz, favoreciendo la germinación, fortaleciendo el desarrollo de las plántulas y mejorando su resistencia a factores ambientales adversos. No obstante, la

intensidad y duración de la exposición son determinantes, ya que una dosis excesiva puede provocar estrés oxidativo y afectar negativamente el crecimiento y viabilidad de las semillas [10]. Por ello, es fundamental controlar el tiempo de exposición y la intensidad de la radiación en las cámaras de desinfección, además de monitorear otros parámetros clave, como temperatura, humedad y gradientes de radiación dentro del sistema. Toda esta información debe ser documentada automáticamente, generando reportes en tiempo real que registren los cambios observados durante el proceso de desinfección.

Este artículo presenta un prototipo de sistema automatizado para el tratamiento de semillas con UV-C, incorporando sensores para recopilar datos durante la desinfección y un sistema de temporización. Además, se propone un método para analizar el color de las semillas antes y después de la irradiación. Toda la información registrada se envía automáticamente a un informe, facilitando su análisis y consulta posterior.

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

A. Arquitectura general

El diseño del sistema se muestra en el diagrama de bloques de la **Figura 1**. El prototipo de la cámara de desinfección integra una lámpara UV-C y sensores encargados de recoger datos durante el proceso de desinfección de semillas. Un microcontrolador gestiona la adquisición de datos de los sensores y controla el encendido de la lámpara. El sistema se comunica mediante un puerto serial con una interfaz de usuario en una computadora, la cual presenta los datos de los sensores en tiempo real y permite configurar el tiempo de exposición a la luz UV-C.

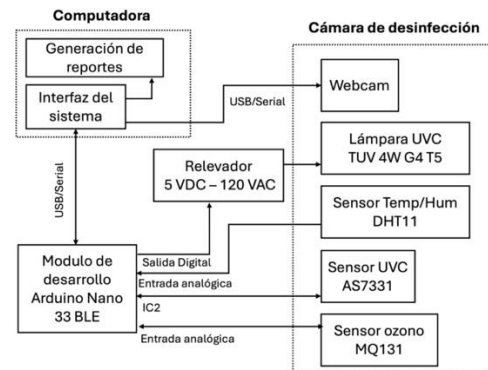


Figura 1.- Diagrama de bloques para desinfección de semillas.

B. Hardware del sistema de control

El sistema encargado de controlar el proceso de desinfección utiliza una tarjeta de desarrollo Arduino Nano 33 BLE, que integra un microcontrolador nRF52840 de Nordic Semiconductors. Este microcontrolador posee una arquitectura ARM^R Cortex^R-M4 de 32 bits que opera a 64 MHz. La tarjeta de desarrollo dispone de varios puertos digitales de entrada/salida, entradas analógicas y puertos de comunicación serial e I2C. Su función principal es la adquisición y transmisión de datos provenientes de los sensores, así como el control de la

temporización de la exposición a la radiación. Para monitorear la intensidad de la radiación UV-C, se utiliza el sensor AS7331, integrado en una tarjeta de desarrollo, que emplea comunicación I2C y se alimenta con 3.3V, asegurando un bajo consumo energético. Además, se utiliza un sensor DHT11 para medir los cambios en las variables de temperatura y humedad durante el proceso de desinfección. Este sensor es compatible con una alimentación de 3.3V y ofrece salida digital de datos. Un pin de salida digital se emplea para activar el relevador que controla el encendido de la lámpara UV-C. Para acoplar la salida digital de 3.3V y energizar la bobina del relevador (que funciona a 5V), se utiliza un transistor 2N3904. El diagrama de conexión y el diseño del PCB en una tarjeta perforada se muestran en la **Figura 2**.

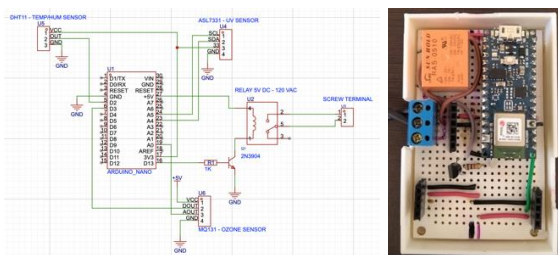


Figura 2.- Prototipo de cámara de desinfección.

C. Prototipo de la cámara de desinfección

Para la construcción de la cámara de irradiación, se utiliza como base una caja de plástico con dimensiones de 20x33x11 cm, forrada con papel aluminio para aislar y reflejar la radiación UV-C. Dentro de esta caja se instala una lámpara incandescente Phillips TUV 4W G4T5, alimentada por un balastro que permite el encendido de la lámpara. En la **Figura 3** se muestra una imagen del interior de la caja con la lámpara instalada.



Figura 3.- Prototipo de cámara de desinfección.

Los sensores AS7331 y DHT11 se ubican en el interior de la cámara de desinfección junto con las semillas para recopilar datos. Estos sensores permiten monitorear en tiempo real las condiciones ambientales durante el proceso de desinfección. El sistema controla el encendido y la duración de la fuente de radiación, asegurando una dosificación adecuada sin afectar la viabilidad de las semillas.

D. Software e interfaz de usuario

El sistema de desinfección de semillas con luz UV-C emplea una computadora que funciona como interfaz para el usuario, a través de una aplicación desarrollada en Python. Esta aplicación permite el control y monitoreo del sistema, así como la

generación automática de reportes. Mediante la interfaz, el usuario puede configurar el tiempo de exposición a la radiación en minutos y visualizar en tiempo real las variables de temperatura, humedad y luz UV. Los datos se reciben a través de una conexión serial desde el Arduino Nano 33 BLE. En la **Figura 4** se presenta la interfaz y el reporte generado por el sistema, que incluye los datos almacenados, la fecha, hora y gráficos de salida.

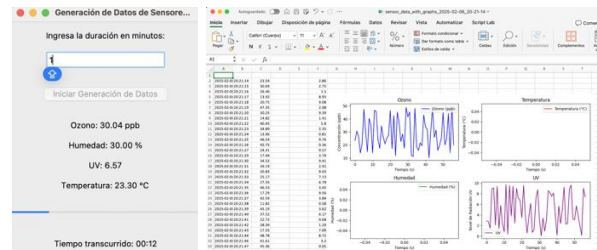


Figura 4.- Interfaz de usuario.

E. Sistema de visión

Después de las pruebas iniciales con los sensores, se integró una cámara al prototipo para añadir funciones de visión y captura de imágenes. Se utilizó una cámara web compacta (6.5x2.5x1.5 cm) con resolución de 1080 px y conexión USB, instalada en la tapa de la caja como se muestra en la **Figura 5**. Se desarrolló una función en Python para la detección de colores en el espacio RGB, que permite obtener valores de color de las semillas colocadas en el prototipo.

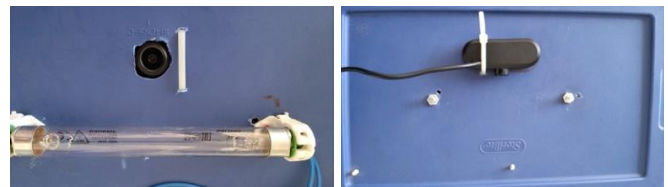


Figura 5.- Instalación de webcam para captura de imágenes.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización de la lámpara UV-C

Para las pruebas iniciales, se configuró el prototipo con una tasa de muestreo de 1 segundo para observar el comportamiento de la lámpara, ya que, debido a su naturaleza, la intensidad máxima de radiación se alcanza después de un período de estabilización. La **Figura 6** muestra los datos obtenidos durante 20 minutos, donde se puede observar la curva de estabilización de la lámpara, así como las variaciones de temperatura y humedad a lo largo de ese tiempo. A partir de esta gráfica, es posible estimar el momento en que la curva de radiación alcanza su valor máximo de estabilización.

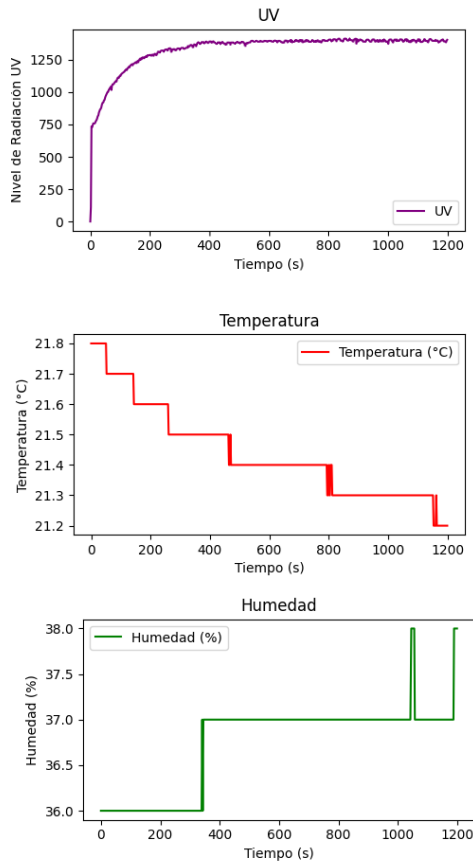


Figura 6.- Gráficas obtenidas en la caracterización de la lámpara

B. Experimentación con muestras de semillas de maíz para determinar beneficios del proceso

Se realizó un conjunto de pruebas con el prototipo utilizando semillas de maíz con características similares en tamaño y forma, seleccionadas manualmente y separadas en bolsas de 120 granos cada una. En total, se utilizaron 6 bolsas que fueron sometidas al proceso de desinfección durante 10 minutos. Como se observó en la caracterización de la lámpara, la radiación máxima se alcanza después de 5 minutos de calentamiento, por lo que se utilizó ese tiempo para calentar el sistema sin semillas. Posteriormente, se fueron agregando las bolsas de una en una, ejecutando el proceso de desinfección. Los datos recolectados durante este experimento fueron almacenados para su posterior análisis. Esta parte se muestra en la Figura 7.



Figura 7.- Experimentación con semillas de maíz.

Tras el proceso de desinfección, se llevó a cabo un experimento de siembra para evaluar los efectos de la radiación UV-C en la germinación y el crecimiento de las semillas de maíz. Se seleccionaron 10 muestras de semillas, tanto radiadas como no radiadas, y se colocaron en cajas Petri con diferentes concentraciones de solución salina y espirulina, como se muestra en la Figura 8. Cabe destacar que el experimento de siembra aún se encuentra en desarrollo.

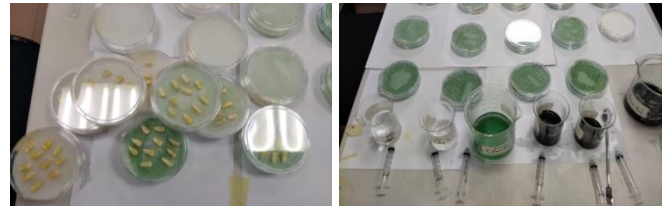


Figura 8.- Siembra de semillas bajo distintas condiciones de estrés.

Este experimento es fundamental para determinar si la exposición a UV-C afecta la viabilidad y el vigor de las semillas, así como su capacidad de adaptación a distintas condiciones de crecimiento. Los resultados obtenidos permitirán evaluar la eficacia del tratamiento de desinfección y su impacto en la fisiología de las semillas.

C. Pruebas con el sistema de visión para detección de cambios en la coloración de las semillas

Paralelamente al desarrollo del sistema automatizado se planteó la posibilidad de analizar cambios en las semillas con técnicas de colorimetría. En [9] se presenta el procedimiento usando un colorímetro manual precalibrado para obtener el perfil de color en el espacio CIELAB. Con la cámara instalada en el mismo prototipo, se desarrolló un programa en Python para identificación de color en muestras de semillas. El programa toma datos de la imagen, específicamente en una área delimitada por un cuadro pequeño y hace un promedio del color predominante para devolver valores en la escala de RGB (rojo, verde y azul), donde cada canal de color toma de 0 a 255. También el programa genera una muestra con el color detectado que se visualiza en la pantalla. En la Figura 7 se pueden ver pruebas al sistema con semillas de distinto color.

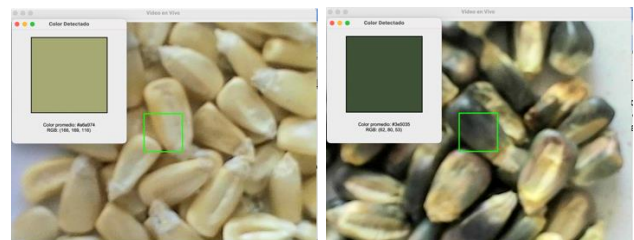


Figura 7.- Resultados básicos de detección de color en RGB

En esta parte del proceso se hicieron pruebas con semillas cuyo contraste de color es evidente, tal como muestra la Figura 7. Los resultados de esta prueba se presentan a continuación:

Tabla 1.- Tamaños y estilos en fuente utilizados para el formato del artículo

Prueba	Color detectado (RGB)	Clave hexadecimal
Maíz blanco	166, 169, 116	#A6A974
Maíz azul	62, 80, 53	#3E5035

Este sistema para hacer el perfil de color de forma automática ayudará a documentar los cambios morfológicos que se presentan en las semillas como consecuencia del proceso de radiación UV-C.

D. Discusión de resultados

La caracterización del tiempo de establecimiento de la lámpara indica que es necesario tener la calibración precisa del sistema para garantizar una exposición homogénea de las 6 bolsas con distintas muestras de semillas. Las características homogéneas de las semillas y las condiciones de desinfección entre las 6 bolsas con las distintas muestras son cruciales para garantizar la consistencia y validez de los resultados del experimento. Si las semillas no tienen características similares (como tamaño, peso, y humedad) o si las condiciones de desinfección (como la intensidad de la radiación UV-C, el tiempo de exposición, y la temperatura) varían entre las bolsas, cualquier diferencia en los resultados podría atribuirse a factores externos y no al tratamiento específico de desinfección. La homogeneidad asegura que las comparaciones entre las distintas muestras sean justas y precisas, permitiendo que las conclusiones del experimento se basen únicamente en los efectos del tratamiento, y no en otras variables que puedan influir en el desempeño de las semillas. Además, la variabilidad en las condiciones de temperatura y humedad durante el proceso de establecimiento es relevante, ya que puede influir en la eficacia de la desinfección, lo que sugiere la necesidad de controlar estos parámetros de manera más rigurosa.

En relación con la prueba de colorimetría se puede destacar su uso para analizar los cambios en las semillas durante el proceso de desinfección, lo que podría ofrecer una perspectiva visual complementaria al análisis tradicional. El desarrollo del programa en Python, que identifica y promedia el color predominante en una área delimitada de las semillas, representa una herramienta útil para monitorear posibles alteraciones en la superficie de las semillas que podrían indicar efectos del tratamiento. Al generar valores RGB, el sistema permite una evaluación cuantitativa y precisa de estos cambios, proporcionando una metodología objetiva para estudiar el impacto de la radiación UV-C.

El sistema presenta varias limitaciones que deben ser abordadas para mejorar su eficacia y seguridad. Primero, la falta de calibración de los sensores y la ausencia de una comparación con equipos calibrados afectan la precisión de las mediciones. Además, el desarrollo de un sistema de colorimetría basado en la escala Lab sería crucial para mejorar la exactitud en la evaluación visual de las semillas. La integración de sensores de presencia es necesaria para garantizar la seguridad, evitando la operación de las lámparas cuando hay operadores cercanos o cuando se abre la tapa. Finalmente, el escalamiento del sistema para operación remota a través de tecnologías como Bluetooth o

Wi-Fi permitiría un control más flexible y eficiente, especialmente en entornos más grandes o industriales.

IV. CONCLUSIONES

El desarrollo del prototipo de cámara de desinfección de semillas con luz UV-C permitió evaluar la efectividad del proceso y su impacto en la viabilidad de las semillas de maíz. Los resultados demostraron la importancia de controlar variables como la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición y las condiciones ambientales para garantizar un tratamiento homogéneo y reproducible. La integración de sensores y la interfaz de usuario facilitaron el monitoreo en tiempo real, mientras que el sistema de visión basado en colorimetría ofreció una herramienta complementaria para analizar cambios en las semillas. No obstante, se identificaron áreas de mejora, como la calibración de los sensores, la implementación de protocolos de seguridad y la optimización del análisis de color mediante la escala Lab. Futuras mejoras incluirán la automatización del proceso, la validación con distintas especies de semillas y la incorporación de tecnologías de conectividad remota para ampliar las aplicaciones del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECTEI) por su apoyo y financiamiento, los cuales hicieron posible esta investigación. También, agradecen al Institute of Advanced Materials for Sustainable Manufacturing del Tecnológico de Monterrey, y al Instituto Politécnico Nacional por proporcionar recursos, instalaciones y orientación académica a lo largo del proyecto.

DECLARACIÓN ÉTICA

Los autores declaran que en esta investigación no se involucraron seres vivos ni se realizaron procedimientos que requirieran el consentimiento de personas o grupos.

CONFLICTO DE INTERESES

No hay conflicto de interés en relación con el artículo presentado. Teniendo en cuenta que el autor y los coautores del artículo mencionan que se presenta un artículo original, no publicado, y que no infringe ningún derecho de autor legal, ni ningún derecho de propiedad o cualquier otro derecho en absoluto.

REFERENCIAS

- [1] K. Bera, P. Dutta, and S. Sadhukhan, "Seed priming with non-ionizing physical agents: plant responses and underlying physiological mechanisms," *Plant Cell Rep*, vol. 41, no. 1, pp. 53–73, Jan. 2022, <https://dx.doi.org/10.1007/s00299-021-02798-y>.
- [2] D. Thomas T.T. and J. T. Puthur, "UV radiation priming: A means of amplifying the inherent potential for abiotic stress tolerance in crop plants," *Environmental and Experimental Botany*, vol. 138, pp. 57–66, Jun. 2017, <https://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.03.003>.
- [3] L. Urban, F. Charles, M. R. A. de Miranda, and J. Aarouf, "Understanding the physiological effects of UV-C light and exploiting its

- agronomic potential before and after harvest,” *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 105, pp. 1–11, Aug. 2016, <https://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.04.004>.
- [4] C. Hernandez-Aguilar *et al.*, “Characterization of Bean Seeds, Germination, and Phenolic Compounds of Seedlings by UV-C Radiation,” *J Plant Growth Regul*, vol. 40, no. 2, pp. 642–655, Apr. 2021, <https://dx.doi.org/10.1007/s00344-020-10125-0>.
- [5] R. K. Mahmood and M. H. Ibrahim, “Testing the effect of ultraviolet C (UV-C) in the germination and growth of local wheat seeds (*Triticum aestivum* L.),” *Plant Archives*, vol. 19, pp. 1279–1281, 2019.
- [6] M. E. V. de Araujo, E. G. Barbosa, R. S. L. de Araújo, I. R. Teixeira, F. A. Gomes, and P. C. Corrêa, “Physiological and sanitary quality of castor oil plant seeds due to ultraviolet-C radiation,” *Industrial Crops and Products*, vol. 137, pp. 9–15, Oct. 2019, <https://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.014>.
- [7] V. Popović, N. Fairbanks, J. Pierscianowski, M. Biancaniello, T. Zhou, and T. Koutchma, “Feasibility of 3D UV-C treatment to reduce fungal growth and mycotoxin loads on maize and wheat kernels,” *Mycotoxin Research*, vol. 34, no. 3, pp. 211–221, 2018, <https://dx.doi.org/10.1007/s12550-018-0316-3>.
- [8] R. Stefanello, R. T. Puntel, W. J. da Silva Garcia, and L. Strazzabosco Dorneles, “Mitigating salt stress by conditioning seeds with ultraviolet light (UV-C) in white oats (*Avena sativa* L.),” *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, vol. 87, no. 13, pp. 533–540, Jul. 2024, <https://dx.doi.org/10.1080/15287394.2024.2345878>.
- [9] C. Hernandez-Aguilar, A. Dominguez-Pacheco, E. Dominguez-Hernandez, R. I. Tsonchev, M. D. C. Valderrama-Bravo, and M. L. Alvarado-Noguez, “Effects of UV-C light and *Spirulina maxima* seed conditioning on the germination and the physical and nutraceutical properties of lentils (*Lens culinaris*)”, <https://dx.doi.org/10.31545/intagr/156025>.
- [10] R. M. Kamel, M. M. El-kholy, N. M. Tolba, A. Amer, A. M. Eltarawy, and L. M. Ali, “Influence of germicidal ultraviolet radiation UV-C on the quality of Apiaceae spices seeds,” *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 9, no. 1, p. 89, Nov. 2022, <https://dx.doi.org/10.1186/s40538-022-00358-4>.