

Una revisión: Tecnología y aplicación en las PFAL

A Review: PFAL technology and applications

Juan Esteban Palacios Duarte¹, Diana Yamileth Velásquez Maldonado²

¹<https://orcid.org/0000-0003-1578-7785>. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Cali, Colombia, jepalaciosd@sena.edu.co

²<https://orcid.org/0000-0003-1773-2649>. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Cali, Colombia, divelasquezm@sena.edu.co

Fecha de recepción: 04/11/2021

Fecha de aceptación del artículo: 29/08/2022



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/17944953/avances.2.8263>

Cómo citar: Palacios Duarte, J. E., & Velasquez Maldonado, D. Y. (2022). Una Revisión: Tecnología y aplicación en las PFAL. Avances Investigación En Ingeniería, 19(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.8263>.

Resumen

En la actualidad, el crecimiento exponencial de la población humana genera un sinnúmero de inconvenientes, como lo es una mayor demanda de alimentos, energía, agua, entre otros. Diferentes soluciones se han propuesto con el fin de maximizar la producción de alimentos. La agricultura vertical ofrece una posible solución, en especial, aprovechando mejor el espacio de producción. De igual forma, se han explorado técnicas para cultivos en ambientes urbanos controlando las variables agroclimáticas que afectan los procesos de crecimiento de las plantas. Por tanto, el objetivo de esta revisión es evidenciar los procesos tecnológicos que conlleva la realización de granjas verticales y los efectos en el crecimiento de diferentes plantas o cultivos.

Palabras clave: Cultivos, granjas verticales, luz artificial (LED), PFAL, Smart farming.

Abstract

Nowadays, the exponential growth of the human population exposes a myriad of drawbacks, such as increased demand for food, energy, water, among others. Different solutions have been proposed to maximize the conscious production of food. One of the possible solutions is known as vertical farm or vertical agriculture, which seeks to take advantage of the production space to the maximum. Likewise, urban cultivation techniques have been explored in environments that control the agroclimatic variables that affect plant growth processes. Therefore, the objective of this review is to demonstrate the technological processes involved in vertical farms and how they affect the growth of different plants or crops.

Keywords: Artificial light (LED), crops, Smart farming, vertical farms.

1. Introducción

De acuerdo con la FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, se estima que el crecimiento poblacional al año 2100 estará cercano a los 11 200 millones de habitantes. Este crecimiento trae consigo un sinnúmero de retos, como lo es una mayor demanda de alimentos, agua y energía [1], [2]. En la actualidad, este panorama ha generado una serie de posibles soluciones.

Desde el punto de vista de la alimentación, se tiene la consigna de aumentar la producción de diferentes cultivos, maximizando el uso del suelo y permitiendo que se puedan obtener los productos en menor tiempo. Una de estas soluciones se ha enfocado en la agricultura urbana, cuyo objetivo principal consiste en que las personas puedan cosechar cultivos básicos en sus hogares, buscando una disminución del consumo de agua y minimizar el uso de químicos.

En el marco de la agricultura urbana, el concepto de granjas verticales ha tomado gran fuerza, ya que permite tener ambientes controlados que buscan no depender de variables naturales que suelen ser impredecibles, como son las heladas, tormentas, huracanes, sequías, entre otros [3].

Cada cultivo tiene unas condiciones agroclimáticas para su óptimo crecimiento; por esta razón es vital crear una red de sensores que permita estar midiendo constantemente las variables agroclimáticas que intervienen en el crecimiento. En ocasiones se logra un ahorro de hasta 95% del consumo normal de agua en procesos que, además, evitan el uso de químicos. De igual forma, se tienen actuadores que se encargan del riego.

Las granjas verticales suelen ser implementadas en cultivos en tierra, hidropónicos o aeropónicos, en cada uno de los cuales el crecimiento de diversos cultivos presenta diferencias importantes [4],

La concepción de las granjas verticales cuenta con ambientes controlados para aumentar la tasa de crecimiento de los cultivos; sin embargo, se hace fundamental el uso de luz artificial que permita emular la luz del sol, la cual es vital y fundamental para la fotosíntesis de las diferentes plantas. En este requisito existe un número importante de investigaciones que se enfocan en encontrar la proporción adecuada de los colores de las lámparas para cultivos [4], [5] y [6].

En países como Japón, diferentes universidades se encuentran trabajando sobre cultivos de lechuga, tomate, cebolla, marihuana, entre otros, identificando los puntos óptimos de crecimiento de estos cultivos con el fin de tener mayor producción anual. Incluso, hay empresas privadas que venden frutas y verduras cultivadas en granjas verticales que demuestran que son productos sin químicos y orgánicos [4].

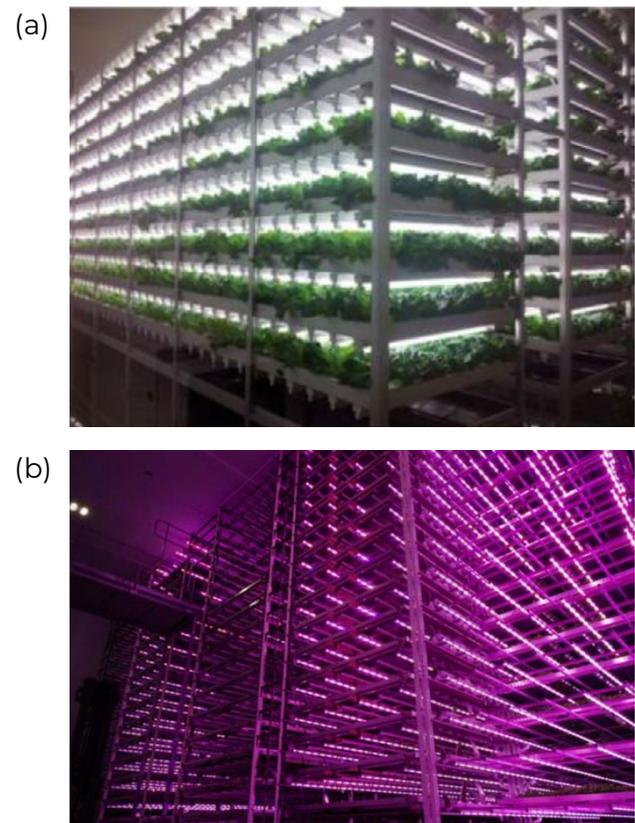


Figura 1. a) Granja vertical Universidad de Chiba, Japón.
b) Granja vertical Jones Food Company. [4]

En la figura 1a se muestra una granja vertical implementada en la Universidad de Chiba, en Japón, la cual está enfocada en el cultivo de lechugas mediante un cultivo hidropónico y con luz artificial blanca. En la figura 1b se muestra la granja vertical de Jones Food Company ubicada North Lincolnshire, Inglaterra, la cual tiene lámparas de proporción rojo y azul que cuenta con una bodega aislada de la luz solar, para el cultivo de lechugas, tomates y otras verduras [7].

2. Tecnología PFAL

La Plant Factory with Artificial Lighting PFAL consiste en instalaciones verticales para la producción de plantas y cultivos con una estructura similar a un almacén, la cual se encuentra térmicamente aislada y hermética. Cuentan con iluminación artificial, en la que destacan las lámparas fluorescentes o LED [8]. De igual forma, las PFAL industriales cuentan con aires acondicionados, extractores de calor, unidades de control de riego, unidades de suministro de nutrientes, CO₂ y unidades de control ambiental [9].

Para lograr un mejor cultivo, las PFAL cuentan con redes de sensores interconectados mediante internet de las cosas (IoT) [10] [11], las cuales se encargan de medir las variables agroclimáticas de interés, sumado a diferentes actuadores que se encargan de mantener estas variables controladas [12] y [13].

Una PFAL cuenta con seis partes fundamentales; inicialmente, debe ser una estructura en forma de bodega la cual debe ser aislada de la luz natural, normalmente mediante paredes opacas, con una estructura de varios niveles de cuatro (4) a dieciséis (16) niveles, conservando una distancia entre niveles de 40 cm verticales [4], [6] [14].

Cada capa de la PFAL es independiente, por lo que en una misma PFAL se pueden cultivar diferentes plantas. Estas capas

cuentan con dispositivos de iluminación artificial, como lámparas de luz fluorescente o lámparas LED, bombas de calor para controlar el enfriamiento, la humidificación y eliminar el calor proveniente de la potencia disipada por las lámparas. De igual forma, tienen equipos tecnológicos para circulación del aire, mejorar la fotosíntesis, la transpiración y una distribución equitativa del aire [15], [16] y [17].

Por su parte, la unidad de CO₂ está diseñada para mantener una concentración en un valor aproximado a los 1.000 umol con el fin de mejorar la fotosíntesis. La unidad de suministros de solución nutritiva se encarga de mantener el suelo con niveles adecuados de conductividad eléctrica, al igual que mediciones de pH; con esto se pueden suministrar los nutrientes para mantener el suelo en mejores condiciones [18] [19].

Algunas PFAL presentan control de la iluminación y un sistema para el control del riego y nutrientes, independientemente de si es un cultivo hidropónico o en suelo [20] [25] [26]. En la figura 2 se muestra los componentes básicos de una PFAL

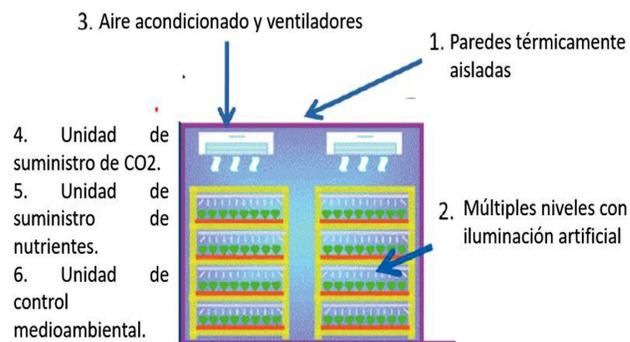


Figura 2. Partes que componen una PFAL [4]

Como se puede evidenciar, las PFAL tienen un número importante de sensores y actuadores que permiten al sistema estar monitoreado y controlado en todo momento. También, es fundamental el uso de sistemas de recolección de datos. Desde ese punto de vista, se puede usar almacenamiento local en cada uno de los elementos o usar redes industriales como SCADA.

Con el crecimiento a grandes pasos de comunicaciones inalámbricas como el wi-fi, bluetooth, infrarrojos, entre otros, las redes de sensores se convierten en nodos de comunicaciones que interactúan en configuraciones maestro - esclavo, centralizados o descentralizados [20] y [21]. Este nivel de comunicación entre dispositivos permite que en las PFAL se obtenga una agricultura inteligente y eficiente [22].

En [10], se evidencia el uso de las IoT para la fabricación de una PFAL. Los autores crean una red de sensores que están en monitoreo de las variables agroclimáticas que son previamente identificadas y adecuadas de acuerdo con el cultivo que se esté realizando.

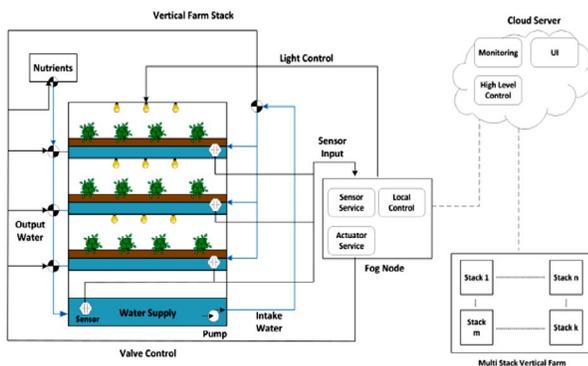


Figura 3. PFAL con aplicación IoT [10]

Estas variables son llevadas a un servidor, el cual permite almacenar y visualizar los datos en una tasa determinada mediante gráficos o tablas. Estos datos se procesan mediante minería de datos, big data, análisis estocásticos y demás, con el fin de tomar acciones de control o decisiones respecto a los cultivos [23] [24].

Finalmente, las PFAL tiene dos retos fundamentales, entre los que se destacan la eficiencia en el uso de la energía y el agua. Por tal motivo, se incursiona en tecnologías basadas en energías renovables para disminuir la demanda a la red eléctrica. Igualmente, para el ahorro de agua se usan procesos de condensación de vapor, recirculación de agua, entre otros [26], [27].

3. Luz artificial en cultivos

Para el crecimiento de los cultivos es fundamental la recepción de la luz, las plantas usan fotorreceptores para capturar la luz, las cuales controlan las respuestas morfológicas y fisiológicas de la planta, sumado a la fotosíntesis. La luz influye en la estructura de la planta, la forma de las hojas, la altura de la planta, la cantidad de semillas, floración, entre otros [28], [29] y [30].

La planta generalmente absorbe un rango de longitudes de onda correspondientes a la radiación PAR que está comprendida entre 400 – 700 nm en la que predominan los colores rojos y azules [31] [32].

En especial, la exposición a luz roja (600 – 700 nm) incrementa la actividad de la fotosíntesis y a su vez un aumento de biomasa, lo cual genera una aceleración al proceso de floración; también hace que las plantas que están expuestas a esta luz sean altas con tallos flexibles y un alto número de hojas [28].

Por su parte, la exposición a la luz azul (400 – 500 nm) que incrementa el rendimiento vegetativo, suele afectar al crecimiento de la planta, la cual suele ser menor que a las plantas que están expuestas al color rojo, con un bajo porcentaje de germinación y un bajo número de hojas.

Las lámparas para cultivos indoor suelen presentar una proporción entre el color rojo y el azul, aprovechando las ventajas que ofrece cada uno de los colores. Normalmente, las lámparas fabricadas en su mayoría de colores rojo y azul suelen presentar plantas bajas, con un tallo grueso y alta densidad de hojas [33] [34].

El uso y proporción de colores que se aplican a las plantas dependen del propósito del cultivo. Por ejemplo, si se requiere para la obtención de flores y semillas, se tienen lámparas con un mayor porcentaje de color rojo [35] [36].

Teniendo presente que se trabaja con lámparas que emulan el sol, es necesario tener en cuenta el fotoperiodo de las plantas, que es el número de horas de luz continua. En las PFAL, el fotoperiodo representa un reto, ya que varía dependiendo del cultivo que se esté realizando. La iluminación artificial debe durar el mismo tiempo que duraría el cultivo bajo la luz en condiciones naturales. Además, el fotoperiodo de la planta cambia, dependiendo de las condiciones climáticas y las estaciones del año [37] y [38].

Las plantas de sombra o de día corto, suelen florecer con una menor cantidad de luz diaria, por su parte las plantas de luz o día largo florecen con mayor facilidad cuando recibe grandes cantidades de luz. Normalmente, el fotoperiodo es de 12 horas, durante las cuales se tienen los picos más altos de irradiancia entre el medio día y las dos de la tarde [16].

Debido a que las PFAL se encuentran aisladas de la luz solar, requieren lámparas artificiales que permitan emular la luz solar y controlar las respuestas fisiológicas y morfológicas de la planta. En el presente artículo se tratarán dos tipos de lámparas: LEDS y fluorescentes.

Lámparas LED: las lámparas basadas en LEDS ofrecen grandes ventajas en cuanto a irradiancia y consumo de potencia. Los LEDS suelen ser duraderos, compactos y económicos, sumados a que permiten un fácil control de su potencia, corriente e iluminación, lo que permite obtener un amplio espectro y gama de colores [4], [6], [17].

La combinación más convencional para los módulos de lámparas LEDS es una proporción de led azul con una longitud de onda aproximada de 460 nm y led rojo con una longitud de onda aproximada de 660 nm [39].

Diferentes estudios se han enfocado respecto a la proporción y los colores de las

lámparas, las cuales, al ser LED, permiten un abanico grande de colores; es por ello que se encuentran módulos de combinaciones RGB, luz violeta, verde, ultravioleta, blanco, entre otros. En la figura 4, se observan diferentes tipos de luces LED que cambian, dependiendo de la potencia y el uso que se le brinde.

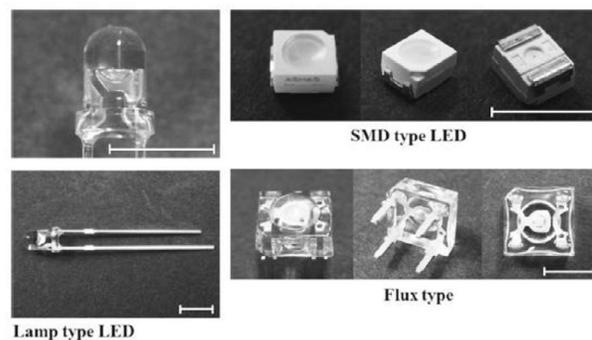


Figura 4. Diferentes tipos de iluminación LED [6]

Las lámparas basadas en luces LED tienen características eléctricas que son fundamentales en el momento de la implementación:

- La corriente eléctrica que fluye por un LED crece de manera exponencial y debe ser controlada mediante una resistencia; esta variable influye en el brillo del LED.
- El flujo espectral es proporcional a la corriente que fluye por un LED cuando la temperatura es constante.
- Al ser basado en silicio, la temperatura es una variable fundamental para el correcto funcionamiento de esta lámpara ya que, si la corriente es constante y hay un sobrecalentamiento, la intensidad lumínica descenderá.
- La corriente máxima que soporta un LED cae drásticamente si la temperatura ambiente aumenta sobre los 40 °C, y soporta un valor máximo de 80 °C de temperatura ambiente.

Lámparas Fluorescentes: las lámparas fluorescentes no tienen una ventaja clara con respecto a las lámparas LED. Sin embargo, son consideradas como la fuente de luz más apropiada para el desarrollo de las PFAL, al

evaluar características como vida útil de la luminaria, eficiencia de la irradiación, disponibilidad de la iluminación y la temperatura superficial de la lámpara [40] [41].

La luz de la lámpara fluorescente usa el principio de emisión de luz por descarga. La luz producida por estas lámparas tiene un espectro de emisión correspondiente a un 37 % de color verde, 42 % de color rojo, 7 % de rojo lejano y un 14 % de luz azul. Gracias a esta distribución se puede indicar que este tipo de lámparas son más cercanas al espectro de la luz solar. Además, teniendo en cuenta las condiciones y características de las PFAL, estas lámparas son adecuadas para llevar a cabo el proceso de crecimiento de las plantas [4] [15].

4. Retos de las granjas verticales

Las PFAL tienen muchas ventajas respecto a la producción de plantas en un proceso que busca un aumento en la producción, de la manera más eficiente. En ese orden de ideas, las PFAL tienen un número importante de limitantes y retos por superar [42].

- 1) Se requiere una estructura que se encuentre aislada de la luz solar y que sea hermética. Igualmente, se usan entre cuatro (4) a dieciséis (16) niveles, lo que implica tener un área grande con una alta demanda de recursos. Por tal motivo, se hace esencial buscar la forma en que las PFAL puedan integrarse con otros sistemas biológicos o de recursos renovables, con el fin de mejorar la sostenibilidad del edificio que las alberga.
- 2) Ampliar la modularidad que permita tener pequeños espacios y que se pueda conectar fácilmente con otros módulos, para hacer una PFAL más grande y adaptada.
- 3) Realizar mediciones no invasivas de la morfología de la planta, pues estas permiten verificar el fenotipo de las plantas y permite que se ajusten factores ambientales para la selección de las mejores especies del cultivo.

- 4) Estandarización de la tecnología de unidades para las componentes de solución nutritiva y la iluminación LED, determinando el uso de los colores y sus longitudes de onda para diferentes cultivos. Debido a la variabilidad del recurso y a que cada cultivo se realiza de forma diferente, no están estandarizados el hardware y el software. Por tanto, el desarrollo de las PFAL en el ámbito nacional o internacional se puede retrasar, ya que no permite la inversión y desarrollo de entes gubernamentales, sumado a que se puede elevar el costo por cada cultivo.
- 5) Las PFAL deben buscar mayor apoyo de parte de la industria y que esta última se acerque a estas nuevas tecnologías en pro de tecnificar los procesos de producción.
- 6) Iluminación Smart con el fin de maximizar el rendimiento al menor costo posible; es decir, aumentar la eficiencia del proceso de iluminación artificial, consumiendo menor cantidad de potencia.
- 7) Softwares más especializados, teniendo en cuenta la variabilidad que se presenta entre cultivos de las PFAL, determinando esta los puntos de ajuste automático del entorno con el fin de cumplir con la función objetivo y las restricciones [4] [43] [44] [45] [46].

Las PFAL abren camino a varios retos, desde el punto de vista económico, social y de recursos energéticos. En lo económico, las PFAL tienen un reto grande, y es ser competitivas en el mercado para ser atractivas a futuros usuarios. El problema radica en que requieren condiciones muy específicas para operar de la manera adecuada, sumado a una alta inversión en los sistemas de control, sensores, actuadores, iluminación, dispositivos electrónicos y el espacio físico que requiere para funcionar. Es por ello que los huertos urbanos y el cultivo mediante técnicas milenarias sigue siendo más atractivo, debido a que implica menores costos [47] [19].

Desde el punto de vista social, el mayor reto para las PFAL radica en la aceptación de obtener alimentos mediante ambientes controlados. Es muy común que las personas prefieran frutas y verduras cultivadas mediante métodos “naturales”, ya que perciben que los alimentos que crecieron bajo la luz LED son artificiales. Así que, desde ese punto de vista, las PFAL deben superar el reto de ser aceptadas y ser vistas como una posible solución para la demanda alimenticia [48].

La tecnología PFAL no es una técnica moderna, pues ya desde el año 2010 se explora fuertemente en el sudeste asiático, especialmente Japón. Países como Estados Unidos y Países Bajos tienen un número importante de empresas privadas que se dedican mediante sus departamentos de I+D y de economía al desarrollo de PFAL. Se estima que esta tecnología se amplíe y llegue a más países siempre y cuando la tecnología se encuentre bien documentada, estandarizada y con empresas interesadas [49] [50].

Finalmente, desde el ámbito de los recursos energéticos, las PFAL ahorran hasta un 95% del agua que se consume en cultivos mediante métodos naturales; sin embargo, tiene un gran reto en el consumo de energía eléctrica, principalmente porque se presenta un alto consumo debido a la conexión de dispositivos electrónicos y múltiples lámparas. Por tanto, es necesario explorar otros sistemas de energías renovables que pueden aliviar el consumo en favor de la sostenibilidad de la PFAL [51].

5. Conclusiones

Las granjas verticales son una solución interesante para aumentar la productividad de

alimentos, porque se pueden tener todas las variables agroclimáticas controladas. Además de tener iluminación artificial que permite controlar la fotosíntesis de la planta y alterar sus respuestas fisiológicas y morfológicas. Estos ambientes controlados permiten a los cultivos estar monitoreados y controlados en todo momento, sin depender de variables externas ni condiciones climáticas.

Aunque las PFAL tienen mucho camino por recorrer, desde el punto de vista tecnológico, económico, social y de eficiencia, presentan un alto potencial de ser competitivas en el mercado y que el interés por este tipo de soluciones sea mucho mayor.

Finalmente, es esencial destacar la cantidad de investigaciones que se han realizado en torno a las PFAL desde varios puntos de vista. Debido a la variabilidad que representa cada cultivo, es fundamental continuar explorando la proporción de luz óptima para el crecimiento del cultivo. De igual forma, explorar las mejores técnicas de riego, inyección de nutrientes, control de vapor y temperatura.

Por otra parte, se evidencian los esfuerzos para avanzar en los modelos de control basados en Deep Learning, Machine Learning, controles predictivos, entre otros, que buscan optimizar en todo momento el proceso de crecimiento de la planta y que esta se haga de la forma más eficiente.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA, Cali - Colombia. Los autores desean agradecer al SENA y la Tecnoacademia Regional Valle por el apoyo y asesoramiento para este trabajo.

Referencias bibliográficas

- [1] Versión resumida de El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2021. FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF, 2021. doi: 10.4060/cb5409es.
- [2] «En un mundo de siete mil millones, es fundamental luchar contra la pobreza y la desigualdad», UNDP. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/presscenter/articles/2011/10/27/in-a-world-of-7-billion-fight-against-poverty-and-inequality-remains-critical.html> (accedido oct. 14, 2021).
- [3] D. Despommier, «Farming up the city: the rise of urban vertical farms», Trends Biotechnol., vol. 31, n.o 7, pp. 388-389, jul. 2013, doi: 10.1016/j.tibtech.2013.03.008.
- [4] T. Kozai, Ed., Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms. Singapore: Springer Singapore, 2018. doi: 10.1007/978-981-13-1065-2.
- [5] M. Urrestarazu, S. Burés, y S. Kotiranta, «Artificial lighting in agriculture», mar. 2018.
- [6] Plant Factory. Elsevier, 2016. doi: 10.1016/C2014-0-01039-8.
- [7] E. Hayashi, «Selected PFALs in Japan», en Plant Factory, Elsevier, 2020, pp. 437-454. doi: 10.1016/B978-0-12-816691-8.00030-3.
- [8] R. Lomax, «PFAL - Plant Factory Artificial Light», 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.16360.78087.
- [9] W. Liu, L. Zha, y. Zhang, «Growth and Nutrient Element Content of Hydroponic Lettuce are Modified by LED Continuous Lighting of Different Intensities and Spectral Qualities», Agronomy, vol. 10, n.o 11, p. 1678, oct. 2020, doi: 10.3390/agronomy10111678.
- [10] I. Haris, A. Fasching, L. Punzenberger, y R. Grosu, «CPS/IoT Ecosystem: Indoor Vertical Farming System», en 2019 IEEE 23rd International Symposium on Consumer Technologies (ISCT), Ancona, Italy, jun. 2019, pp. 47-52. doi: 10.1109/ISCE.2019.8900974.
- [11] M. I. H. bin Ismail y N. M. Thamrin, «IoT implementation for indoor vertical farming watering system», en 2017 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE), Kanazawa, nov. 2017, pp. 89-94. doi: 10.1109/ICEESE.2017.8298388.
- [12] V. S. Lerner, K. A. Franklin, y G. C. Whitelam, «Photoreceptors and Light Signalling Pathways in Plants», en Endogenous Plant Rhythms, A. J. W. Hall y H. McWatters, Eds. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2006, pp. 106-131. doi: 10.1002/9780470988527.ch5.
- [13] C. E. Wong, Z. W. N. Teo, L. Shen, y H. Yu, «Seeing the lights for leafy greens in indoor vertical farming», Trends Food Sci. Technol., vol. 106, pp. 48-63, dic. 2020, doi: 10.1016/j.tifs.2020.09.031.
- [14] T. Kozai, S. Sakaguchi, T. Akiyama, K. Yamada, y K. Ohshima, «Design and management of PFALs», en Plant Factory, Elsevier, 2020, pp. 357-375. doi: 10.1016/B978-0-12-816691-8.00025-X.
- [15] M. O. K. Azad et al., «The Evaluation of Growth Performance, Photosynthetic Capacity, and Primary and Secondary Metabolite Content of Leaf Lettuce Grown under Limited Irradiation of Blue and Red LED Light in an Urban Plant Factory», Agriculture, vol. 10, n.o 2, p. 28, ene. 2020, doi: 10.3390/agriculture10020028.
- [16] H. Dou, G. Niu, M. Gu, y J. Masabni, «Effects of Light Quality on Growth and Phytonutrient Accumulation of Herbs under Controlled Environments», Horticulturae, vol. 3, n.o 2, p. 36, jun. 2017, doi: 10.3390/horticulturae3020036.
- [17] P. H. Mashkov, H. I. Beloev, B. S. Gyoch, R. Y. Kandilarov, y T. G. Pencheva, «LED equipment for light influence on photosynthesis investigations», en 2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, sep. 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/ET.2017.8124352.
- [18] M. Rakhra y R. Singh, «Smart data in innovative farming», Mater. Today Proc., p. S2214785321003266, feb. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.237.
- [19] Y. Shao et al., «The effects of vertical farming on indoor carbon dioxide concentration and fresh air energy consumption in office buildings», Build. Environ., vol. 195, p. 107766, may 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107766.
- [20] M. Balasubramaniyan y C. Navaneethan, «Applications of Internet of Things for smart farming – A survey», Mater. Today Proc., vol. 47, pp. 18-24, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.480.

- [21] A. Villa-Henriksen, G. T. C. Edwards, L. A. Pesonen, O. Green, y C. A. G. Sørensen, «Internet of Things in arable farming: Implementation, applications, challenges and potential», *Biosyst. Eng.*, vol. 191, pp. 60-84, mar. 2020, doi: [10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013).
- [22] S. Goyal, R. Kumar, S. Tamta, y V. Vimal, «Smart Vertical Farming», ago. 14, 2020
- [23] S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw, y M.-J. Bogaardt, «Big Data in Smart Farming – A review», *Agric. Syst.*, vol. 153, pp. 69-80, may 2017, doi: [10.1016/j.agry.2017.01.023](https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023).
- [24] O. Visser, S. R. Sippel, y L. Thiemann, «Imprecision farming? Examining the (in)accuracy and risks of digital agriculture», *J. Rural Stud.*, vol. 86, pp. 623-632, ago. 2021, doi: [10.1016/j.jrurstud.2021.07.024](https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.07.024).
- [25] J. Lee y I.-T. Chuang, «Living Green Shell: Urban micro-vertical farm», en 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), Sapporo, Japan, may 2017, pp. 1087-1090. doi: [10.1109/ICASI.2017.7988181](https://doi.org/10.1109/ICASI.2017.7988181).
- [26] F. C. L. Belista, M. P. C. Go, L. L. Lucenara, C. J. G. Policarpio, X. J. M. Tan, y R. G. Baldovino, «A Smart Aeroponic Tailored for IoT Vertical Agriculture using Network Connected Modular Environmental Chambers», en 2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), Baguio City, Philippines, nov. 2018, pp. 1-4. doi: [10.1109/HNICEM.2018.8666382](https://doi.org/10.1109/HNICEM.2018.8666382).
- [27] J. Bauer y N. Aschenbruck, «Design and implementation of an agricultural monitoring system for smart farming», en 2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany), Tuscany, may 2018, pp. 1-6. doi: [10.1109/IOT-TUSCANY.2018.8373022](https://doi.org/10.1109/IOT-TUSCANY.2018.8373022).
- [28] M. Flores, E. Gonzalez, y V. Escalona, «Respuestas de las plantas frente al estímulo lumínico», Chile.
- [29] L. Liang, H. Tian, y P. Ning, «Artificial light LED planting system design», en 2017 14th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS), Beijing, nov. 2017, pp. 88-90. doi: [10.1109/IFWS.2017.8245981](https://doi.org/10.1109/IFWS.2017.8245981).
- [30] S. S. S. Yusof, N. M. Thamrin, Mohd. K. Nordin, A. S. Mohd. Yusoff, y N. J. Sidik, «Effect of artificial lighting on typhonium flagelliforme for indoor vertical farming», en 2016 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Selangor, Malaysia, oct. 2016, pp. 7-10. doi: [10.1109/I2CACIS.2016.7885280](https://doi.org/10.1109/I2CACIS.2016.7885280).
- [31] X. Chen, Y. Li, L. Wang, y W. Guo, «Red and blue wavelengths affect the morphology, energy use efficiency and nutritional content of lettuce (*Lactuca sativa* L.)», *Sci. Rep.*, vol. 11, n.o 1, p. 8374, dic. 2021, doi: [10.1038/s41598-021-87911-7](https://doi.org/10.1038/s41598-021-87911-7).
- [32] Research Centre on Urban Environment for Agriculture and Biodiversity, Agricultural Sciences Department, Alma Mater Studiorum – University of Bologna, Bologna, Italy et al., «Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs)», *Eur. J. Hortic. Sci.*, vol. 85, n.o 5, pp. 297-309, oct. 2020, doi: [10.17660/eJHS.2020/85.5.1](https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.1).
- [33] M. K. Shahwar, A. H. El-Ghorab, F. M. Anjum, M. S. Butt, S. Hussain, y M. Nadeem, «Characterization of Coriander (*Coriandrum sativum* L.) Seeds and Leaves: Volatile and Non Volatile Extracts», *Int. J. Food Prop.*, vol. 15, n.o 4, pp. 736-747, jul. 2012, doi: [10.1080/10942912.2010.500068](https://doi.org/10.1080/10942912.2010.500068).
- [34] A. Diederichsen, S. Banniza, C. Armstrong-Cho, y T. Sander, «*Coriandrum sativum* L. – Coriander», en *Medicinal, Aromatic and Stimulant Plants*, vol. 12, J. Novak y W.-D. Blüthner, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 265-281. doi: [10.1007/978-3-030-38792-1_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38792-1_4).
- [35] L. Santiago Santos y A. Cedeño, «Efecto de la intensidad de la luz sobre la floración y crecimiento del culantro», 1995, p. 7, abr. 1995.
- [36] L. McAusland et al., «Growth Spectrum Complexity Dictates Aromatic Intensity in Coriander (*Coriandrum sativum* L.)», *Front. Plant Sci.*, vol. 11, p. 462, may 2020, doi: [10.3389/fpls.2020.00462](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00462).
- [37] S.-G. Kong y K. Okajima, «Diverse photoreceptors and light responses in plants», *J. Plant Res.*, vol. 129, n.o 2, pp. 111-114, mar. 2016, doi: [10.1007/s10265-016-0792-5](https://doi.org/10.1007/s10265-016-0792-5).
- [38] M. T. Naznin, M. Lefsrud, V. Gravel, y X. Hao, «Different ratios of red and blue LED light effects on coriander productivity and antioxidant properties», *Acta Hortic.*, n.o 1134, pp. 223-230, may 2016, doi: [10.17660/ActaHortic.2016.1134.30](https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.30).
- [39] P. Melgarejo, «La iluminación en los invernaderos», Universidad Miguel Hernandez, Elche, España, 2005.

- [40] R. A. Yalçın y H. Ertürk, «Improving crop production in solar illuminated vertical farms using fluorescence coatings», *Biosyst. Eng.*, vol. 193, pp. 25-36, may 2020, doi: [10.1016/j.biosystemseng.2020.02.007](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.02.007).
- [41] S. Lin, «Fluorescent Lighting», en *Computer Vision*, K. Ikeuchi, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 478-479. doi: [10.1007/978-3-030-63416-2_515](https://doi.org/10.1007/978-3-030-63416-2_515).
- [42] F. Baumont De Oliveira y S. Ferson, «Methodology for a Risk Assessment Decision Support System in Vertical Farming», may 2019.
- [43] M. H. M. Saad, N. M. Hamdan, y M. R. Sarker, «State of the Art of Urban Smart Vertical Farming Automation System: Advanced Topologies, Issues and Recommendations», *Electronics*, vol. 10, n.o 12, p. 1422, jun. 2021, doi: [10.3390/electronics10121422](https://doi.org/10.3390/electronics10121422).
- [44] T. Kozai y G. Niu, «Challenges for the Next-Generation PFAL», en *Plant Factory*, Elsevier, 2016, pp. 387-393. doi: [10.1016/B978-0-12-801775-3.00027-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00027-5).
- [45] F. Kalantari, O. M. Tahir, R. A. Joni, y E. Fatemi, «Opportunities and Challenges in Sustainability of Vertical Farming: A Review», *J. Landsc. Ecol.*, vol. 11, n.o 1, pp. 35-60, ene. 2018, doi: [10.1515/jlecol-2017-0016](https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0016).
- [46] T. Kozai y G. Niu, «Challenges for the next-generation PFALs», en *Plant Factory*, Elsevier, 2020, pp. 463-469. doi: [10.1016/B978-0-12-816691-8.00032-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00032-7).
- [47] A. Santini, E. Bartolini, M. Schneider, y V. Greco de Lemos, «The crop growth planning problem in vertical farming», *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 294, n.o 1, pp. 377-390, oct. 2021, doi: [10.1016/j.ejor.2021.01.034](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.034).
- [48] K. Al-Kodmany, «The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City», *Buildings*, vol. 8, n.o 2, p. 24, feb. 2018, doi: [10.3390/buildings8020024](https://doi.org/10.3390/buildings8020024).
- [49] F. Kalantari, O. Mohd Tahir, A. Mahmoudi Lahijani, y S. Kalantari, «A Review of Vertical Farming Technology: A Guide for Implementation of Building Integrated Agriculture in Cities», *Adv. Eng. Forum*, vol. 24, pp. 76-91, oct. 2017, doi: [10.4028/www.scientific.net/AEF.24.76](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.24.76).
- [50] F. B. de Oliveira, H. Forbes, D. Schaefer, y J. M. Syed, «Lean Principles in Vertical Farming: A Case Study», *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 712-717, 2020, doi: [10.1016/j.procir.2020.03.017](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.017).
- [51] M. Bacco et al., «Smart farming: Opportunities, challenges and technology enablers», en 2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany), Tuscany, may 2018, pp. 1-6. doi: [10.1109/IOT-TUSCANY.2018.8373043](https://doi.org/10.1109/IOT-TUSCANY.2018.8373043).