



Cómo un sistema inteligente está revolucionando el cultivo de hortalizas de hoja verde a través de la transpiración

Luis Alberto López González

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Coral Martínez Nolasco *

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Juan José Martínez Nolasco

*Tecnológico Nacional de México / IT de
Celaya,
Celaya, Guanajuato, México*

Luis Ramón Sánchez Rico

*Tecnológico Nacional de México / IT de Roque,
Celaya, Guanajuato, México*

* Autor de correspondencia: coral.mn@celaya.tecnm.mx

Resumen: Este artículo presenta un sistema que ayuda a los agricultores a controlar la transpiración ideal de las hortalizas de hoja verde. Usando sensores, un programa inteligente y una pantalla fácil de usar, el sistema mantiene el "Déficit de Presión de Vapor" (VPD) en niveles óptimos que regulan perfectamente cómo las plantas "sudan" o transpiran. En nuestras pruebas con diversos cultivos como espinaca, lechuga y acelga, las plantas crecieron más uniformes, se redujo el desperdicio, se usó menos agua y disminuyeron las enfermedades. Lo mejor es que esta tecnología está al alcance del agricultor.

Palabras clave: *agricultura protegida, hortalizas, inteligencia artificial, sensores, vapor.*

1. Introducción: *lo que debemos saber de inicio*

Las hortalizas de hoja verde como espinacas, lechugas y diversas variedades de verduras están ganando popularidad por su alto contenido nutricional y su adaptabilidad a sistemas de cultivo protegido. Son relativamente fáciles de cultivar, pero para obtener cosechas

óptimas en calidad y cantidad, los agricultores necesitan mantener condiciones ambientales precisas, algo que tradicionalmente ha sido complicado y costoso.

¿Se han preguntado alguna vez por qué algunas plantas crecen mejor que otras, incluso cuando parecen recibir el mismo cuidado? La respuesta podría estar en el aire que las rodea, específicamente en algo llamado "Déficit de Presión de Vapor" o VPD. Este término puede sonar técnico, pero básicamente describe la "sed" que tiene el aire, es decir, cuánta humedad puede absorber a cierta temperatura (Figura 1).

Para las hortalizas de hoja verde, mantener este valor en un rango ideal (entre 0.4 y 0.8 kilopascales "kPa") puede marcar la diferencia entre cultivos mediocres y extraordinarios. Sin embargo, controlar este valor ha sido históricamente difícil, especialmente para pequeños agricultores que no pueden permitirse sistemas costosos.



Figura 1. El VPD describe cuánta sed tiene el aire, no la planta. Pero cuanto más sediento esté el aire, más agua le "roba" a la planta.

Obtenida de: elaboración propia.

Como señalan Zhang et al. (2018), Milošević et al. (2012), Garcia-Caparros et al. (2017) e Iwabuchi et al. (1996), en la etapa vegetativa de cultivos similares, el mantenimiento de un VPD entre 0.4 y 0.8 kPa promueve un desarrollo foliar óptimo. Este rango permite un equilibrio ideal entre la transpiración y la absorción de agua, maximizando el crecimiento de las hojas y el contenido de clorofila.

El cultivo de hortalizas de hoja en ambientes protegidos presenta desafíos particulares debido a su sensibilidad a las condiciones ambientales. Un VPD demasiado bajo puede crear condiciones favorables para patógenos fúngicos, mientras que valores excesivamente altos pueden provocar estrés hídrico y reducir la calidad del producto final. El manejo manual de

estos parámetros resulta prácticamente imposible debido a las fluctuaciones constantes y las complejas interacciones entre diferentes variables ambientales.

2. Fundamentos Teóricos: reglas y principios científicos importantes

El Déficit de Presión de Vapor (VPD)

Imaginen que el aire es una esponja: cuando está caliente puede absorber mucha agua, y cuando está fría absorbe menos. El VPD nos dice qué tan "sedienta" está esa esponja, y se mide en una unidad llamada kilopascal (kPa).

Para calcularlo, necesitamos conocer dos valores: cuánta humedad podría contener el aire a cierta temperatura (presión de vapor saturado) y cuánta humedad contiene realmente (presión de vapor actual). La diferencia entre estos dos valores es el VPD. Matemáticamente, lo expresamos así con la ecuación (1):

$$VPD = es(T) - ea \quad (1)$$

Donde:

VPD = Déficit de presión de vapor (kPa) (1)

es(T) = Presión de vapor de saturación a la temperatura del aire T (kPa)

ea = Presión de vapor actual del aire (kPa)

Para las hortalizas de hoja verde, mantener el VPD entre 0.4-0.8 kPa es importante ya que este rango optimiza la absorción de nutrientes y el desarrollo foliar mientras minimiza el riesgo de enfermedades fúngicas. El VPD afecta directamente a la transpiración de las plantas, proceso mediante el cual el agua se evapora de las hojas.

Una tasa de transpiración adecuada es esencial para el transporte de nutrientes y la termorregulación. Cuando el VPD es demasiado bajo, la transpiración se reduce, limitando la absorción de nutrientes y aumentando el riesgo de enfermedades. Por otro lado, un VPD excesivamente alto incrementa la tasa de transpiración, pudiendo provocar estrés hídrico y cierre estomático, lo que afecta negativamente a la fotosíntesis y, consecuentemente, al crecimiento de la planta.

Shamshiri et al. (2018) observaron que cultivos de hoja se presentan un desarrollo óptimo cuando el VPD se mantiene entre 0.4 y 0.8 kPa, con una temperatura ambiental entre 18-

22°C. Estos rangos permiten un equilibrio ideal entre la transpiración y la absorción de agua, maximizando el crecimiento y la calidad del producto final-

Los ojos y oídos: sensores inteligentes

Se instaló en el invernadero pequeños dispositivos (sensores) que funcionan como "ojos y oídos" en el cultivo. Estos sensores miden constantemente la temperatura del aire, la humedad en el ambiente y otros factores ambientales importantes. Estos dispositivos envían lecturas cada determinado tiempo, permitiéndonos tener una imagen detallada y en tiempo real de lo que está ocurriendo en el invernadero.

Aprendizaje Automático aplicado a la agricultura

El Aprendizaje Automático (*Machine Learning*) es una forma de enseñar a las computadoras a tomar decisiones basadas en ejemplos previos, similar a cómo los humanos aprendemos de la experiencia. En nuestro caso, utilizamos un método llamado "Bosque Aleatorio" (*Random Forest Regressor*, abreviado como "RFR"), que funciona como si tuviéramos muchos "jardineros expertos" opinando sobre las condiciones ideales para las plantas, y luego tomáramos una decisión basada en la mayoría de las opiniones.

De acuerdo con Cletus & John (2024), el funcionamiento interno del algoritmo RFR implica varios procesos clave que contribuyen a su eficacia en aplicaciones de agricultura de precisión. Durante la fase de entrenamiento, cada árbol en el "bosque" se construye utilizando un subconjunto aleatorio de los datos originales. Esta diversidad de perspectivas permite al sistema hacer predicciones más precisas sobre el VPD ideal para diferentes condiciones ambientales.

3. Desarrollo del Trabajo: *aplicando las reglas y principios científicos*

El desarrollo del sistema para el control de VPD en cultivos de hoja verde integró diferentes tecnologías y metodologías que se detallan a continuación:

Infraestructura sensorial y de almacenamiento

Se instaló en el invernadero pequeños dispositivos (sensores) que funcionan como "ojos y oídos" en el cultivo. Estos sensores miden constantemente la temperatura del aire, la

humedad en el ambiente y otros factores ambientales importantes. Estos dispositivos envían lecturas cada 5 minutos, permitiendo tener una imagen detallada y en tiempo real de lo que está ocurriendo en el invernadero.

Se implementó una base de datos PostgreSQL (versión 14.3) con una arquitectura modular diseñada para manejar eficientemente los diferentes tipos de datos generados por el sistema. La comunicación entre sensores y la base de datos se realizó mediante scripts en Python utilizando la biblioteca psycopg2, que permite conexiones eficientes a PostgreSQL. Se implementó un sistema de colas para gestionar picos en la recopilación de datos, asegurando que ninguna lectura se pierda incluso durante interrupciones temporales de la conexión.

Sistema inteligente de predicción y recomendación

Toda la información recopilada por los sensores llega a la base de datos, donde entra en juego nuestro "jardinero digital" - el programa de inteligencia artificial RFR. Este programa analiza todos los datos y aprende patrones que le permiten predecir cuál será el VPD basándose en las condiciones actuales, recomendar ajustes para mantener el ambiente ideal y mejorar con el tiempo, aprendiendo de nuevos datos.

El modelo de RFR se implementó en Python 3.9 utilizando scikit-learn 1.2.2. La preparación de datos comenzó con la recopilación de variables ambientales de sensores distribuidos en el invernadero. Estos datos fueron sometidos a un proceso de limpieza para eliminar valores atípicos y completar datos faltantes mediante interpolación lineal.

Un componente clave del sistema es el algoritmo de recomendaciones que genera sugerencias específicas para ajustar las condiciones ambientales actuales (Figura 2). Este algoritmo toma en cuenta no solo las predicciones del modelo RFR, sino también restricciones prácticas como la capacidad de los sistemas de control ambiental y el costo energético de las intervenciones. Las recomendaciones se generan buscando mantener el VPD en el rango óptimo mientras se minimiza el consumo energético.

Interfaz amigable para el agricultor

La interfaz se compone de varios módulos funcionales interconectados. El panel de control principal muestra un resumen en tiempo real de las condiciones actuales del invernadero, destacando el VPD actual y su tendencia reciente. Un sistema de codificación por colores

permite una interpretación rápida del estado del sistema: verde para condiciones óptimas, amarillo para advertencias y rojo para alertas.

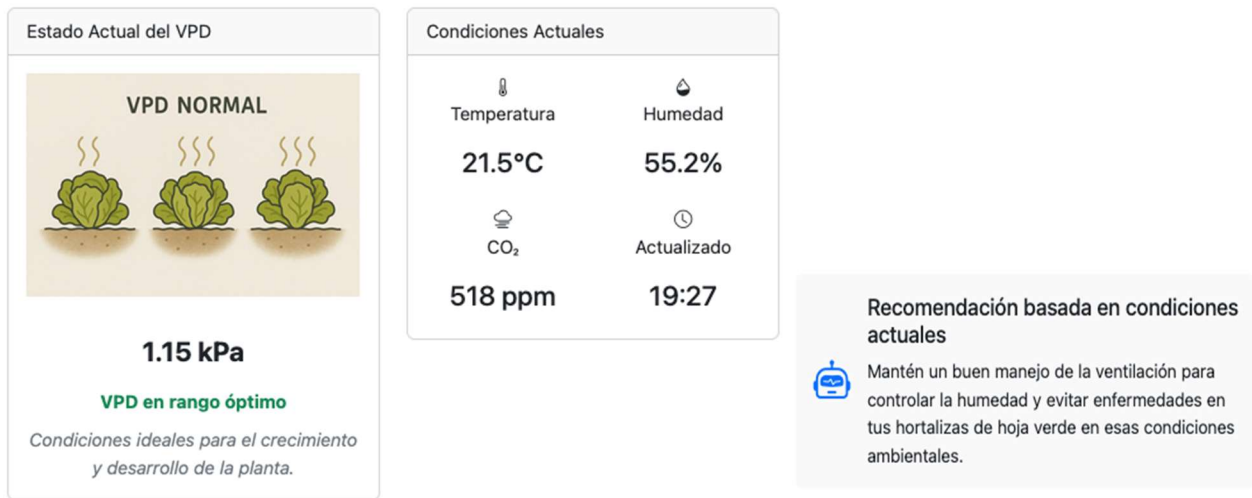


Figura 2. Estado, condiciones y recomendaciones actuales para el cultivo.

Obtenida de: elaboración propia.

La sección de gráficos (Figura 3) permite a los usuarios explorar tendencias en diferentes variables a lo largo del tiempo. Los usuarios pueden seleccionar períodos específicos para análisis detallado y exportar datos en formato de Excel para análisis adicionales. El sistema de alertas mantiene a los usuarios informados sobre condiciones que requieren atención inmediata.

Dashboard de Monitoreo (2291469)

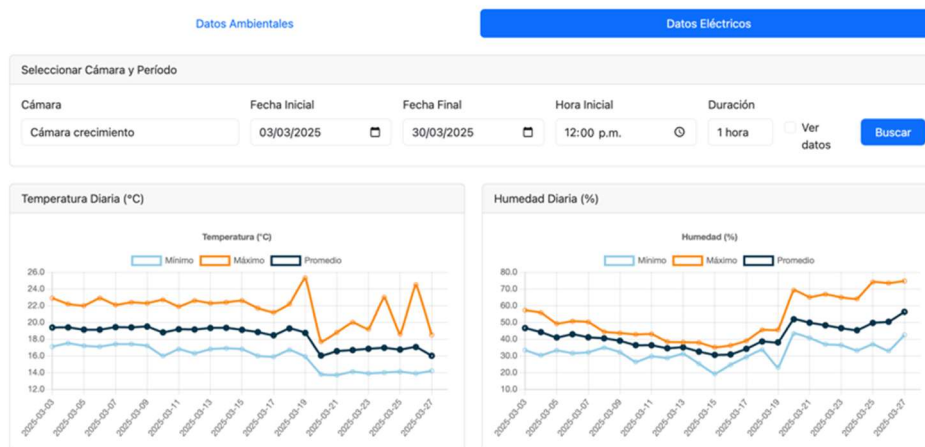


Figura 3. Interfaz de monitoreo de VPD mostrando gráficos de tendencias y alertas.

Obtenida de: elaboración propia.

El módulo de recomendaciones traduce los resultados del modelo RFR en acciones concretas que el agricultor puede implementar. Estas recomendaciones se presentan en lenguaje sencillo y se acompañan de explicaciones breves sobre su fundamento científico, fomentando así el aprendizaje continuo del usuario.

Se probó el sistema en un invernadero experimental durante ciclos completos de cultivo con diferentes hortalizas de hoja verde. Los resultados fueron relevantes en cada caso: las plantas no solo crecieron más uniformes y con mejor apariencia, sino que también se desperdició menos producto, se usó menos agua y disminuyeron significativamente las enfermedades causadas por hongos.

4. Conclusiones: *lo que podemos aprender de este artículo*

El sistema para controlar el VPD en cultivos de hoja verde demuestra que la tecnología avanzada no tiene que ser complicada ni costosa para ser efectiva. Con componentes accesibles y programas de código abierto, creamos una solución que permitió plantas con crecimiento más uniforme y mejor calidad, reducción significativa del desperdicio de producto, ahorro importante en el consumo de agua y disminución de enfermedades causadas por hongos.

Lo más valioso de esta investigación es comprobar que un factor ambiental a menudo ignorado como el VPD puede tener un impacto tan significativo en el desarrollo de las plantas. Además, demostramos que es posible controlar este factor utilizando tecnologías accesibles, poniendo las ventajas de la agricultura de precisión al alcance de agricultores con distintos niveles de recursos.

Lo más importante es que este sistema está al alcance de agricultores con diferentes niveles de recursos y conocimientos técnicos. No es necesario ser un experto en tecnología o tener grandes inversiones para beneficiarse de la agricultura de precisión.

Actualmente estamos trabajando para perfeccionar el sistema, ampliando su aplicación a más variedades de cultivos de hoja y adaptándolo para que funcione incluso sin conexión a internet. Con soluciones como esta, buscamos democratizar el acceso a las técnicas avanzadas de cultivo, permitiendo a más agricultores producir alimentos de mejor calidad, usando menos recursos y cuidando mejor nuestro planeta.

5. Referencias: *por si quieres seguir conociendo más*

- Cletus, F., & John, A. E. (2024). Comparative Analysis Of Machine Learning Models For Greenhouse Microclimate Prediction. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 4(1), 162–175. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.3783>
- Iwabuchi, K., Saito, G., Goto, E., & Takakura, T. (1996). EFFECT OF VAPOR PRESSURE DEFICIT ON SPINACH GROWTH UNDER HYPOBARIC CONDITIONS. *Acta Horticulturae*, 440, 60–64. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1996.440.11>
- Milošević, T., Milošević, N., Glišić, I., & Mladenović, J. (2012). Fruit quality attributes of blackberry grown under limited environmental conditions. *Plant, Soil and Environment*, 58(7), 322–327. <https://doi.org/10.17221/33/2012-pse>
- PostgreSQL Global Development Group. (2023). *PostgreSQL Documentation (Version 15)*. Recuperado de <https://www.postgresql.org/docs/>
- Shamshiri, R. R., Jones, J. W., Thorp, K. R., Ahmad, D., Man, H. C., & Taheri, S. (2018). Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*, 32(2), pp. 287–302). Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0005>
- Zhang, X., He, D., Niu, G., Yan, Z., & Song, J. (2018). Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2), 33–40. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181102.3420>