

Toward a Predictive Model of Foliar Diseases: Integrating IoT Data and Agronomic Sampling in Family Farming

Néstor Castro¹ , Claudia Queiruga¹ , Jorge Rosso¹ , Matías Pagano¹ ,
Agustín Candia¹ , Marina Stocco² , Agustina Gargoloff^{3,4} , and Enrique
Goites⁵ , Javier Díaz¹ 

¹ LINTI – Facultad de Informática, UNLP, La Plata, Argentina
`{ncastro,claudiaq,jrosso}@info.unlp.edu.ar`,
`{matiasp,acandia}@linti.unlp.edu.ar`, `jdiaz@unlp.edu.ar`

² CIDEFI – Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, Argentina
`marinastocco@agro.unlp.edu.ar`

³ LIRA – Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, Argentina
`agustina.gargoloff@agro.unlp.edu.ar`

⁴ SPS – Secretaría de Políticas Sociales, UNLP, La Plata, Argentina

⁵ INTA-IPAF Región Pampeana, Argentina
`goites.enrique@inta.gob.ar`

Abstract. This work is framed within the R&D&I project “Development of a predictive model of foliar diseases in leafy crops produced in greenhouses that follow the principles of agroecology,” from LINTI-UNLP, carried out in collaboration with FCAyF-UNLP and producer families from the horticultural belt of the city of La Plata. Based on a validated and operational low-cost IoT infrastructure, this article describes advances toward the integration of environmental and agronomic data for the development of a foliar disease predictive model. Three complementary lines of work were carried out: the validation of DHT22 sensor reliability through comparison with an industrial EM300 sensor and manual records; the selection of beetroot as the case study crop and its associated foliar diseases; and the systematic sampling of disease incidence and severity in a greenhouse over four months. The integration of automatic environmental data (temperature and humidity) with agronomic observations on disease severity constitutes the central contribution, enabling the construction of a structured dataset — with weekly accumulated microenvironmental variables as predictors and average severity as the dependent variable — that serves as the empirical basis for training a regression model adapted to agroecological family farming conditions.

Keywords: agroecology , family farming , IoT , LoRa , foliar diseases , predictive model

Hacia un modelo predictivo de enfermedades foliares: integración de datos IoT y muestreos agronómicos en agricultura familiar

Resumen Este trabajo se enmarca en el proyecto de I+D+i “Desarrollo de un modelo predictivo de enfermedades foliares en cultivos de hoja producidos en invernáculos que siguen los principios de la agroecología”, del LINTI-UNLP, desarrollado en articulación con la FCAyF-UNLP y familias productoras del cinturón hortícola de ciudad de La Plata. Sobre la base de una infraestructura IoT de bajo costo, validada y operativa, el presente artículo describe los avances orientados a la integración de datos ambientales y agronómicos para el desarrollo de un modelo predictivo de enfermedades foliares. Para ello se llevaron a cabo tres líneas de trabajo complementarias: la validación de la confiabilidad de los sensores DHT22 mediante comparación con un sensor industrial EM300 y registros manuales; la selección de la remolacha como cultivo de estudio y sus enfermedades foliares asociadas; y el muestreo sistemático de incidencia y severidad de enfermedades en un invernáculo durante cuatro meses. La integración de datos ambientales automáticos con observaciones agronómicas sobre la severidad de las enfermedades constituye el aporte central, permitiendo construir un conjunto de datos estructurado —con variables microambientales acumuladas semanalmente como predictoras y la severidad promedio como variable dependiente— que sirve de base empírica para el entrenamiento de un modelo de regresión adaptado a las condiciones de la agricultura familiar agroecológica.

Keywords: agroecología , agricultura familiar , IoT , LoRa , enfermedades foliares , modelo predictivo

1 Introducción

El cinturón hortícola de La Plata abastece entre el 60% y el 90% de la verdura fresca que consume la provincia de Buenos Aires y otras provincias del país, constituyéndose en el más importante de la Argentina. Esta producción es llevada adelante por familias productoras de alimentos que combinan producción bajo invernáculos y a campo abierto, en superficies que no superan las 1,5 ha., en general en tierras alquiladas.

En este contexto, las enfermedades foliares causadas por hongos y pseudo-hongos representan una amenaza recurrente para la producción. Enfermedades endémicas en la región como el oídio (*Erysiphe cichoracearum*), la mildiu (*Bremia* spp.), la viruela de acelga y la remolacha (*Cercospora beticola*) y la roya blanca (*Albugo* spp.) pueden comprometer seriamente el rendimiento y la calidad de los cultivos. Desde un enfoque agroecológico, el manejo de estas enfermedades

no busca su erradicación sino su regulación dentro de umbrales tolerables, privilegiando la aplicación oportuna y preventiva de bioinsumos por sobre el uso de agroquímicos de síntesis. Para que esta estrategia sea efectiva, es necesario anticipar las condiciones que favorecen la aparición de dichas enfermedades con la suficiente antelación como para que los bioinsumos actúen eficazmente.

Desde el año 2023, el equipo de trabajo que presenta este artículo viene desarrollando, en articulación con familias productoras del cinturón hortícola de la localidad de Arana (ciudad de La Plata), el proyecto de I+D+i “Predicción automática de enfermedades foliares en cultivos de hoja producidos en invernáculos bajo manejo agroecológico”. Este proyecto, de carácter interdisciplinario, reúne especialistas en informática, ingeniería, fitopatología y agroecología, y se propone contribuir al desarrollo de tecnologías digitales de bajo costo adaptadas a las necesidades y condiciones de la agricultura familiar. La cocreación de conocimientos y tecnologías a partir de un proceso colaborativo entre productores/as y profesionales de distintas disciplinas promueve una comprensión situacional adecuada para la resolución de problemas en territorios heterogéneos como el cinturón hortícola platense (Queiruga et al., 2024).

En trabajos previos se describieron y analizaron los principales desafíos tecnológicos enfrentados durante el despliegue de la infraestructura IoT en el periurbano platense (Castro, Candia, et al., 2024), los aprendizajes sobre el diseño e implementación de sus componentes clave (Castro, Queiruga, et al., 2024) y la recolección y análisis de datos ambientales (temperatura y humedad) durante una etapa experimental de cinco meses y medio, incluyendo la identificación de umbrales ambientales relevantes para la aparición de enfermedades foliares (Castro et al., 2025). Como resultado de ese recorrido, el proyecto cuenta hoy con una infraestructura IoT de bajo costo, validada y operativa, que recolecta datos de temperatura y humedad relativa en los invernáculos de manera automática y continua.

El presente artículo describe los avances del proyecto durante 2025, orientados a la construcción de variables de análisis para el desarrollo de un modelo predictivo de enfermedades foliares. Para ello se llevaron a cabo tres líneas de trabajo complementarias: a) la validación de la confiabilidad de los datos ambientales provenientes de sensores DHT22 mediante comparación con los obtenidos de un sensor industrial y de registros manuales; b) la selección de un cultivo como caso de estudio, específicamente la remolacha y sus enfermedades foliares asociadas; c) el desarrollo de una metodología de muestreo sistemático en el invernáculo para el relevamiento de incidencia y severidad de enfermedades foliares sobre el cultivo seleccionado (remolacha), aplicada durante 4 meses, que constituye la base empírica para la construcción de variables de análisis del modelo predictivo. La integración de los datos ambientales recolectados automáticamente por los sensores IoT con los datos de incidencia y severidad obtenidos mediante los muestreos en el invernáculo constituye el aporte central de este trabajo.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el marco conceptual; en la sección 3 se sintetiza el punto de partida; en la sec-

ción 4 se describen las variables de análisis; y en la sección 5 se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

2 Marco conceptual

El marco conceptual de este trabajo se organiza en tres ejes que reflejan la naturaleza interdisciplinaria del problema abordado: a) las enfermedades foliares en cultivos de invernáculo bajo manejo agroecológico y el enfoque desde el cual el proyecto las aborda, ya que este encuadre agronómico determina tanto la elección de las variables de análisis como el tipo de intervención que el modelo predictivo busca orientar; b) las variables ambientales y agronómicas relevantes para la predicción de enfermedades foliares, que constituyen las entradas y salidas del modelo; y c) el rol de las tecnologías IoT como herramienta para la recolección automática y continua de datos microambientales en el contexto específico de la agricultura familiar, justificando su adopción frente a otras alternativas tecnológicas disponibles.

La articulación de estos tres componentes (enfoque agroecológico, variables de análisis y tecnología IoT) define el marco desde el cual se desarrolla el trabajo presentado en las secciones siguientes.

2.1 Enfermedades foliares en cultivos de invernáculo bajo manejo agroecológico

La descripción y cuantificación del ciclo de una enfermedad constituye la base fundamental de la epidemiología vegetal y una herramienta esencial para el manejo eficiente de los cultivos. El poder predecir cuándo una enfermedad alcanzará un umbral que cause pérdidas económicamente significativas es uno de los usos más relevantes de esta disciplina. Las condiciones necesarias para el desarrollo de una enfermedad requieren la concurrencia de tres factores: una cepa virulenta del agente patógeno, un hospedante susceptible y condiciones ambientales adecuadas para la infección, colonización y reproducción del patógeno.

Desde un manejo agroecológico, la lógica del “control de enfermedades” es reemplazada por el “manejo de enfermedades”, que busca regular a los organismos fitopatógenos y no erradicarlos, vinculando su tratamiento al concepto de “umbral de daño económico”. Este enfoque implica un proceso continuo de selección y uso de técnicas orientadas a reducir las enfermedades a un nivel tolerable. En este marco, los bioinsumos, productos basados en compuestos de microorganismos o plantas capaces de mejorar la sanidad de los cultivos sin generar impactos negativos en el agroecosistema, representan una alternativa económicamente atractiva y ecológicamente aceptable. Dado que su efecto es predominantemente preventivo, resulta fundamental anticipar las condiciones microambientales que favorecen la aparición de enfermedades para optimizar su aplicación.

En el cinturón hortícola del periurbano platense, las enfermedades foliares causadas por hongos y pseudohongos son endémicas en los cultivos de hoja producidos en invernáculos. Entre las más frecuentes se encuentran el oídio (*Erysiphe*

cichoracearum), la mildiu (*Bremia* spp.), la viruela de la acelga y la remolacha (*Cercospora beticola*) y la roya blanca (*Albugo* spp.). Estas enfermedades pueden comprometer seriamente el rendimiento y la calidad de los cultivos, con impacto directo sobre la economía de las familias productoras.

2.2 Variables ambientales e indicadores epidemiológicos para la predicción de enfermedades foliares

La predicción de enfermedades foliares requiere integrar dos tipos de variables:

- **Variables ambientales**, fundamentalmente temperatura y humedad relativa: determinan las condiciones microambientales que favorecen o inhiben el desarrollo de los patógenos. Investigaciones previas sugieren que registros consecutivos de humedad relativa superiores al 75% combinados con temperaturas superiores a 25°C incrementan significativamente la probabilidad de aparición de enfermedades foliares como la viruela en cultivos de invernáculo.
- **Variables agronómicas** que permiten cuantificar el estado sanitario del cultivo: mediante dos indicadores de la epidemiología vegetal, la *incidencia*, que expresa la proporción de plantas afectadas sobre el total muestreado, y la *severidad*, que estima el porcentaje de tejido foliar dañado por planta.

La integración de ambos tipos de variables en un modelo predictivo permite anticipar la aparición de enfermedades y orientar la toma de decisiones hacia la aplicación preventiva y oportuna de bioinsumos.

2.3 IoT como herramienta para la recolección automática de datos microambientales en la agricultura familiar

Internet de las Cosas (IoT) se refiere a ecosistemas de dispositivos físicos dotados de sensores, capacidad de procesamiento y conectividad, que permiten capturar, transmitir y procesar datos del entorno de manera automática y continua. En el ámbito agrícola, estas tecnologías habilitan esquemas de monitoreo en tiempo real de variables microambientales críticas para el desarrollo de los cultivos, tales como temperatura, humedad relativa, humedad de suelo, radiación o concentración de CO₂, entre otras. Su incorporación ha demostrado mejorar la capacidad de observación del sistema productivo, favoreciendo decisiones más oportunas y basadas en evidencia para el manejo sanitario y agronómico (Mansoor et al., 2025).

En el caso específico de la agricultura familiar agroecológica, el uso de IoT presenta un valor diferencial al posibilitar la construcción de soluciones de bajo costo, escalables y adaptadas a contextos productivos donde los recursos económicos, la infraestructura de conectividad y la disponibilidad de equipamiento comercial suelen ser limitados. Este enfoque se inscribe dentro del paradigma de la Agricultura 4.0, entendida como la incorporación de tecnologías digitales, sensorica distribuida, conectividad, análisis de datos e inteligencia computacional para optimizar procesos productivos y mejorar la eficiencia en el uso de recursos.

A su vez, el trabajo se proyecta hacia una visión de Agricultura 5.0, donde estas tecnologías no sólo persiguen eficiencia productiva, sino también sostenibilidad, resiliencia y una articulación más estrecha entre conocimiento experto, decisiones humanas y sistemas inteligentes de apoyo, aspectos especialmente relevantes en contextos de agricultura familiar agroecológica (Javaid et al., 2022).

Dentro de las tecnologías de comunicación disponibles para estos escenarios, LoRa y LoRaWAN resultan especialmente adecuadas por combinar bajo consumo energético, largo alcance y reducidos costos de despliegue, características particularmente relevantes en zonas periurbanas donde la conectividad a Internet puede ser intermitente o depender de enlaces domiciliarios. Estas redes LPWAN permiten conectar nodos sensores distribuidos en distintos invernáculos o parcelas con un único gateway, simplificando la infraestructura necesaria y favoreciendo la sostenibilidad operativa del sistema en el tiempo (Pagano et al., 2022; Singh et al., 2020).

3 Punto de partida tecnológico: infraestructura IoT y confiabilidad de los datos

El proyecto cuenta con una infraestructura IoT de bajo costo desplegada y operativa desde 2023 en un invernáculo de una familia productora de la organización “Manos de la Tierra” en la localidad de Arana, La Plata. Dicha infraestructura, descrita en detalle en trabajos previos (Castro, Candia, et al., 2024; Castro, Queiruga, et al., 2024; Castro et al., 2025), combina tecnología LoRaWAN e Internet domiciliaria para la transmisión de datos, y energía solar para la alimentación autónoma de los nodos sensores. Los nodos IoT instalados en los invernáculos recolectan datos de temperatura y humedad relativa ambiente mediante sensores DHT22 en intervalos de una hora, los cuales son transmitidos al servidor del LINTI donde se almacenan en una base de datos de series de tiempo (InfluxDB) y se visualizan mediante la plataforma Grafana. Actualmente se dispone de más de un año de datos microambientales recolectados de manera continua, que constituyen la base empírica para el desarrollo del modelo predictivo.

La confiabilidad de los datos recolectados por los sensores IoT es un aspecto central del proyecto, ya que impacta directamente en la validez de las variables de análisis que alimentarán el modelo predictivo. Para evaluar el desempeño de los sensores DHT22 se realizó una comparación cruzada de mediciones durante un período continuo de un mes, entre el 14 de marzo y el 14 de abril de 2025, utilizando tres fuentes complementarias instaladas en el mismo invernáculo: los dos sensores DHT22 del nodo IoT ubicados a distinto nivel respecto del suelo, un sensor industrial Milesight EM300 y un termohigrómetro de uso agronómico.

Los resultados mostraron que ambos sensores DHT22 presentaron un comportamiento similar entre sí, manteniéndose dentro de márgenes aceptables de linealidad e histéresis para aplicaciones no críticas. Sin embargo, se identificaron limitaciones en la medición de humedad relativa cuando ésta supera el 80%, momento en el cual los sensores tienden a saturarse y perder exactitud. Este

comportamiento se registró particularmente en el horario nocturno, entre las 21 hs y las 9 hs del día siguiente, coincidiendo con las condiciones de mayor humedad en el invernáculo. Dado que los valores de humedad superiores al 75% son precisamente los que determinan las condiciones de riesgo para la aparición de enfermedades foliares, los registros en ese rango serán normalizados tomando como referencia las mediciones del sensor industrial EM300, que no presenta saturación en condiciones de alta humedad.

4 Construcción de variables de análisis

En este apartado se describe el proceso de construcción de las variables de análisis necesarias para el desarrollo del modelo predictivo. Se organiza en tres secciones: a) la selección del cultivo y la enfermedad a estudiar, que da cuenta de las decisiones interdisciplinarias que orientaron el trabajo de campo; b) la metodología de muestreo sistemático implementada en el invernáculo para el relevamiento de incidencia y severidad de la enfermedad; y c) la integración de los datos de muestreo con los datos microambientales recolectados automáticamente mediante los sensores IoT, que constituye el aporte central de este trabajo hacia el desarrollo del modelo predictivo.

4.1 Selección del cultivo y la enfermedad a estudiar

La selección del cultivo y las enfermedades foliares a estudiar fue el resultado de un proceso de decisión interdisciplinario que integró criterios agronómicos, epidemiológicos y operativos, llevado a cabo en conjunto por el equipo de informática, fitopatología y agroecología con la participación activa de las familias productoras.

Desde el punto de vista agronómico, la remolacha (*Beta vulgaris*) es un cultivo de otoño-invierno ampliamente producido en los invernáculos del cinturón hortícola platense bajo manejo agroecológico. Su ciclo de producción, que se extiende desde el otoño hasta entrado el invierno, coincide con las condiciones microambientales de mayor humedad relativa en el invernáculo, lo que lo convierte en un cultivo especialmente susceptible a enfermedades foliares causadas por hongos y pseudohongos. Entre las enfermedades foliares que afectan a la remolacha en la región, la viruela (*Cercospora beticola*) fue identificada como la de mayor incidencia y relevancia productiva por las familias productoras y el equipo de fitopatología, constituyéndose en la enfermedad de referencia para el desarrollo del modelo predictivo.

Desde el punto de vista operativo, la elección de la remolacha como cultivo de estudio responde además a su presencia sostenida en los invernáculos de la familia productora durante el período de recolección de datos, lo que garantiza la disponibilidad de registros simultáneos de variables microambientales y estado sanitario del cultivo necesarios para el entrenamiento del modelo. En el contexto de la agricultura familiar agroecológica, la diversidad y rotación de cultivos puede

dificultar la acumulación de datos sobre un cultivo específico, más aún teniendo en cuenta que se trata de invernáculos en producción.

La enfermedad seleccionada, la viruela de la acelga y la remolacha causada por el hongo *Cercospora beticola*, se manifiesta mediante manchas foliares circulares de color pardo con halo rojizo que llega a desprenderse, lo que reduce la superficie fotosintética de la planta y puede comprometer seriamente el rendimiento y la calidad del cultivo (Fig. 1). Su desarrollo está fuertemente asociado a condiciones de alta humedad relativa (90%), temperaturas diurnas entre 25–32°C y nocturnas no inferiores a 17°C, lo que la convierte en un caso de estudio adecuado para explorar la relación entre variables microambientales y aparición de enfermedades foliares en invernáculos bajo manejo agroecológico (Rangel et al., 2020).



Fig. 1. Hojas de remolacha con síntomas de viruela causada por *Cercospora beticola*.

4.2 Metodología de muestreo y datos obtenidos

El relevamiento del estado sanitario del cultivo de remolacha se realizó mediante muestreos sistemáticos en el invernáculo durante un período de 4 meses, comprendido entre julio y octubre de 2025. La unidad de muestreo fue la planta individual, relevándose en cada muestreo un total de 15 plantas seleccionadas de manera representativa dentro del invernáculo. Para cada planta se registraron tres variables: el estado fenológico, expresado como la cantidad de hojas presentes al momento del muestreo; la incidencia, registrada de forma binaria como presencia o ausencia de síntomas de viruela en la planta; y la severidad, estimada como el porcentaje de superficie foliar afectada por hoja, calculándose luego el promedio de severidad por planta. La frecuencia de muestreo fue semanal y se definió en función del ritmo de desarrollo de la enfermedad y de la disponibilidad operativa del equipo técnico. Los muestreos fueron registrados en planillas digitales que permitieron su posterior integración con los datos microambientales obtenidos. La Fig. 2 es un ejemplo de una planilla de muestreo.

El gráfico de la Fig. 3, construido a partir de los datos obtenidos durante los 4 meses, muestra un crecimiento progresivo típico de enfermedades policíclicas, donde el patógeno completa varios ciclos de infección, reproducción y dispersión a lo largo de la estación de crecimiento de la remolacha. La severidad aumenta

Planta		1																
Estado fenologico		17																
Incidencia (presencia o no)		si																
Hoja por planta		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Severidad (% de sintoma)	Valor de severidad por hoja	0	0	0	0	6	8	10	6	15	20	12	6	12	8	15	15	20
	Promedio x planta	9																

Fig. 2. Ejemplo de planilla de muestreo.

desde valores cercanos al 1% en julio finalizando con valores de alrededor de 7,8% en octubre. Si se analizan las fases de una curva policíclica, la fase inicial se observa en el mes de julio con una severidad muy baja (0,8–1,3%), posiblemente asociada a poco inóculo inicial o a condiciones ambientales poco favorables. La fase de crecimiento exponencial se observa desde el mes de agosto hasta mediados de septiembre, con un aumento sostenido de 1,2 a 4,4% de severidad, asociado a los múltiples ciclos secundarios donde la tasa de infección se acelera. A comienzos de septiembre se registra una leve caída o meseta en el aumento de la enfermedad, que puede deberse a condiciones adversas ambientales para el patógeno o prácticas de manejo (ventilación del invernáculo y aplicación de bioinsumos). Por último, se observa una reanudación del crecimiento (finales de septiembre a octubre) donde la severidad retoma su aumento hasta 7,8%. Esto confirma el carácter policíclico de la curva de progreso de la enfermedad, con picos de infección que pueden ser interrumpidos, pero se recuperan si hay inóculo y condiciones favorables.

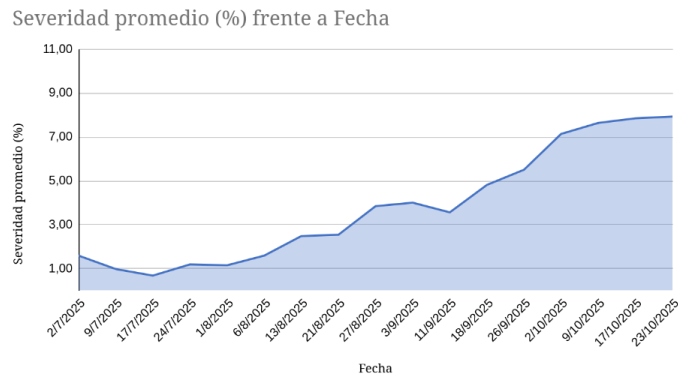


Fig. 3. Evolución de la severidad promedio de muestreo durante 4 meses (7-10/25).

4.3 Integración de variables microambientales y sanitarias

La construcción de las variables de análisis para el modelo predictivo requirió integrar dos fuentes de datos de naturaleza diferente: a) los datos microambientales de temperatura y humedad relativa recolectados automáticamente cada 10 minutos por los sensores IoT (EM300), y b) los datos de incidencia y severidad de la viruela de la remolacha obtenidos mediante los muestreos sistemáticos descritos en la sección anterior.

La construcción del conjunto de datos para el modelado se organiza en dos tipos de variables:

- **Variables sanitarias:** se utilizó como indicador principal la severidad promedio de la viruela de la remolacha. Esta variable se construyó a partir de muestreos semanales realizados entre julio y octubre, evaluando el porcentaje de tejido foliar afectado en todas las hojas de 15 plantas.
- **Variables microambientales predictoras:** se definieron variables microambientales agregadas a partir de los datos obtenidos de los sensores, basadas en criterios fitopatológicos.

Desde el punto de vista fitopatológico, las condiciones favorables para el desarrollo de la viruela de remolacha son días calurosos con temperaturas mayores a 25°C, noches frescas con temperaturas inferiores a 17°C, y alta concentración de humedad (entre 90% y 95%), esta última condición que actúa como factor potenciador del riesgo de infección fúngica (Kiehr et al., 2024).

En torno a estos umbrales se definieron las variables microambientales en un proceso iterativo: inicialmente se seleccionaron la temperatura promedio, máxima y mínima diaria; luego estas mismas variables se agruparon durante el día y la noche y se analizaron las amplitudes térmicas; si bien fueron un punto de partida interesante para el análisis de la relación de datos microambientales con la severidad de la enfermedad, resultaron insuficientes dado que pueden enmascarar una cantidad significativa de temperaturas fuera de los umbrales establecidos; finalmente, en búsqueda de variables de análisis más precisas, se consideró medir la cantidad de horas acumuladas en las cuales un cultivo está expuesto a condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad en cuestión, discriminadas entre el día y la noche.

En síntesis, las variables microambientales predictoras basadas en los criterios fitopatológicos son:

- **Acumulado de horas diurnas calurosas:** cantidad de horas diarias con temperaturas entre 25°C y 32°C.
- **Acumulado de horas nocturnas frescas:** cantidad de horas con temperaturas inferiores a 17°C.
- **Humedad relativa crítica:** registros iguales o superiores al 90%.

La Fig. 4 muestra el acumulado de horas diurnas con temperaturas mayores a 25°C y nocturnas inferiores a 17°C.

De los gráficos de las Fig. 5 y 6 se puede observar que en invierno los valores de la humedad promedio se mantuvieron mayormente entre 85% y 90% y, en primavera entre 65% y 80%. Se observa que a pesar de que la humedad promedio en primavera descendió respecto de la de invierno, si se analizan junto con las temperaturas diurnas y nocturnas se evidencia que estos valores cumplen la condición de días calurosos, noches frescas y humedad alta finalizando el invierno.

La integración de las variables sanitarias y microambientales constituye el núcleo metodológico para el desarrollo del modelo predictivo. El conjunto de datos resultante queda estructurado de la siguiente manera: la **variable dependiente** es la severidad promedio semanal de la viruela (*Cercospora beticola*), obtenida en cada fecha de muestreo como el promedio del porcentaje de tejido foliar afectado sobre las 15 plantas relevadas. Las **variables predictoras** seleccionadas

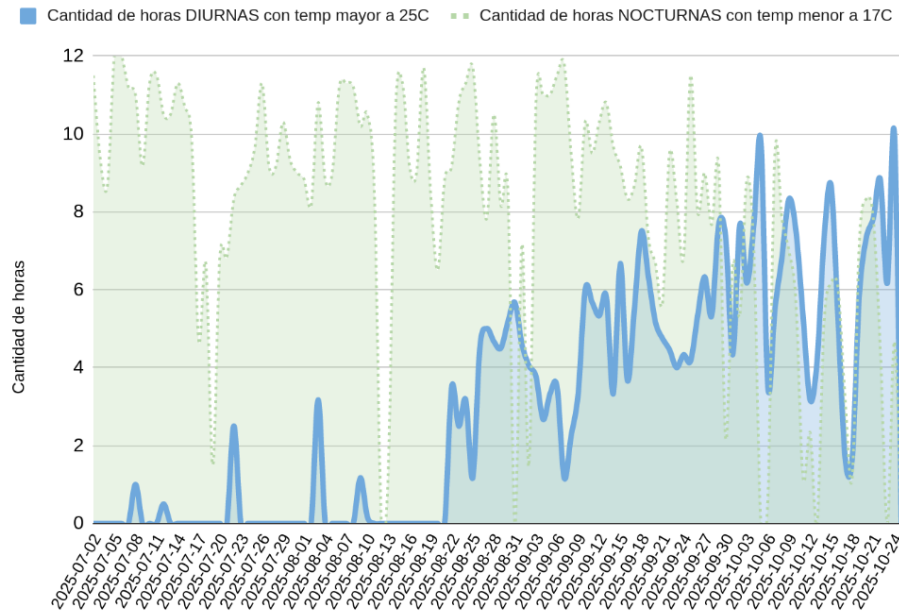


Fig. 4. Evolución temporal acumulada de las temperaturas diurnas ($>25^{\circ}\text{C}$) y nocturnas ($<17^{\circ}\text{C}$).

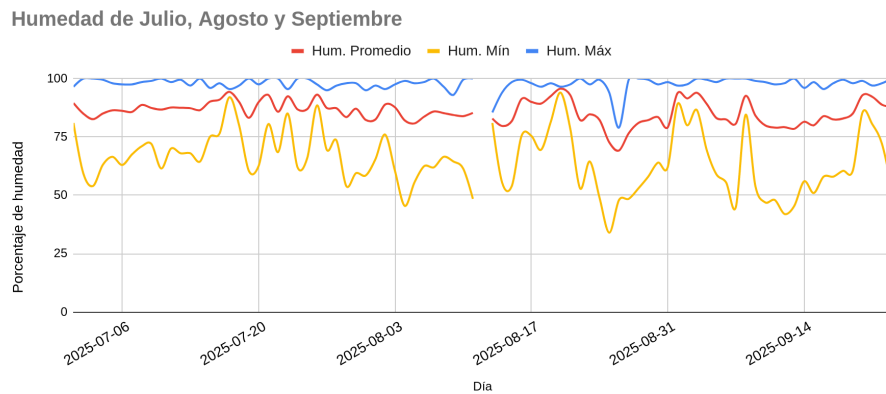


Fig. 5. Evolución temporal de la humedad relativa en los meses 7, 8 y 9.

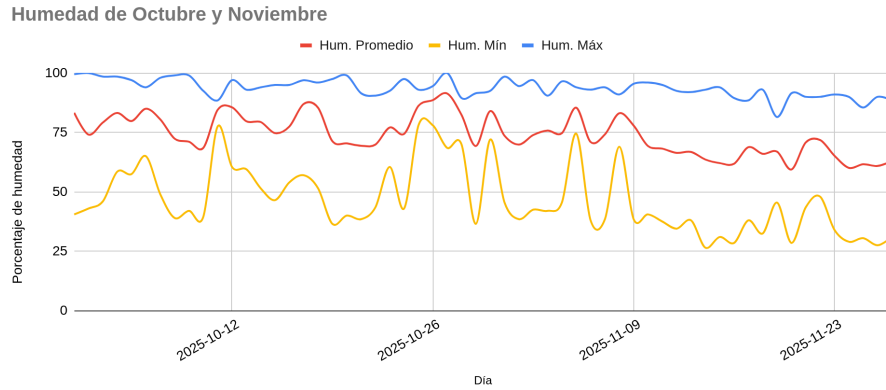


Fig. 6. Evolución temporal de la humedad relativa en los meses 10 y 11.

son: la temperatura diurna promedio semanal, la temperatura nocturna semanal, el acumulado semanal de horas diurnas con temperatura entre 25°C y 32°C, el acumulado semanal de horas nocturnas con temperatura inferior a 17°C, y el acumulado semanal de horas con humedad relativa igual o superior al 90%. La **unidad temporal de integración** es la semana: para cada fecha de muestreo se calculan los acumulados de las variables microambientales correspondientes a los 7 días previos, período durante el cual las condiciones ambientales actuaron sobre el cultivo antes de que la enfermedad fuera observada. La **sincronización** entre los registros automáticos (cada 10 minutos) y los muestreos semanales se resuelve mediante agregación: los datos del sensor EM300 son filtrados y acumulados por semana epidemiológica, generando un único valor por variable predictora para cada punto de muestreo. Esta estructura permite construir un conjunto de datos donde cada fila representa una semana de observación con su correspondiente estado sanitario y sus condiciones microambientales previas, constituyendo la base empírica para el entrenamiento del modelo de regresión. La elección de acumulados semanales por sobre promedios diarios responde a que la epidemiología de *Cercospora beticola* es acumulativa: no es la condición de un día aislado sino la exposición sostenida a condiciones favorables lo que determina el avance de la enfermedad, lo que justifica esta forma de agregación como la más adecuada para capturar la dinámica del patógeno.

5 Conclusiones y trabajo futuro

Este trabajo presenta los avances del proyecto I+D+i “Desarrollo de un modelo predictivo de enfermedades foliares en cultivos de hoja producidos en invernáculos que siguen los principios de la agroecología” del LINTI, Facultad de Informática de la UNLP, hacia la construcción de las variables de análisis necesarias para el desarrollo de un modelo predictivo de enfermedades foliares en invernáculos de agricultura familiar agroecológica, de la localidad de Arana, La Plata.

En primer lugar, la validación de los sensores DHT22 mediante comparación con el sensor industrial EM300 y registros manuales permitió establecer los límites de confiabilidad de los datos recolectados automáticamente. Se identificó una limitación sistemática en la medición de humedad relativa superior al 80%, rango crítico para la predicción de enfermedades foliares, lo que justifica la normalización de esos registros tomando como referencia el sensor de mayor precisión.

En segundo lugar, la selección de la remolacha (*Beta vulgaris*) y la viruela (*Cercospora beticola*) como caso de estudio se fundamentó en criterios agronómicos, epidemiológicos y operativos acordados con las familias productoras. La enfermedad elegida presenta una relación clara y documentada con las variables microambientales disponibles en la infraestructura IoT del proyecto.

En tercer lugar, los muestreos sistemáticos realizados entre julio y octubre de 2025 generaron una serie temporal de incidencia y severidad consistente con el comportamiento policíclico esperado para *Cercospora beticola*, con severidad creciente desde 0,8% en julio hasta 7,8% en octubre, incluyendo una meseta en septiembre asociada posiblemente a condiciones adversas al patógeno o a prácticas de manejo agroecológicas.

Finalmente, la integración de las variables microambientales —acumulado de horas diurnas con temperatura entre 25°C y 32°C, horas nocturnas con temperatura inferior a 17°C y registros de humedad relativa igual o superior al 90%— con los datos de severidad obtenidos mediante el muestreo constituye el aporte metodológico central del trabajo. El análisis preliminar muestra que la “doble condición” de días calurosos y noches frescas combinada con alta humedad se corresponde con los períodos de mayor incremento de la severidad observados hacia fines del invierno y comienzos de la primavera.

Como trabajo futuro se prevé entrenar y validar un modelo de regresión lineal a partir del conjunto de datos construido, explorar alternativas que capturen mejor el carácter policíclico de la enfermedad y escalar a otros invernáculos y enfermedades foliares relevantes para la producción hortícola familiar del CHLP. Se espera que aporte valor en una dimensión aplicada anticipando condiciones microambientales para optimizar la aplicación de bioinsumos según el “umbral de daño económico”, con impacto en la sanidad del cultivo y los costos de producción y en una dimensión metodológica integrando datos ambientales automáticos con observaciones agronómicas situadas, en un enfoque replicable que fortalezca la autonomía tecnológica de la agricultura familiar frente a soluciones diseñadas para la agricultura extensiva.

References

- Castro, N., Candia, A., Queiruga, C., Pagano, M., Moscoso Ocampo, M., & Díaz, J. (2024). Desafíos tecnológicos de un proyecto de IoT para la agricultura familiar y manejo agroecológico en invernaderos del periurbano de La Plata. *Memorias de las JAIIO*, 10(3), 118–130. <https://revistas.unlp.edu.ar/JAIIO/article/view/17963>

- Castro, N., Queiruga, C., Candia, A., Moscoso Ocampo, M., Pagano, M., & Díaz, J. (2024). Aprendizajes en el diseño de una infraestructura IoT para la Agricultura Familiar. una experiencia en el cinturón hortícola de La Plata. *Libro de Actas del XXX Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2024)*, 873–881. <https://doi.org/10.35537/10915/172755>
- Castro, N., Queiruga, C., Pagano, M., Candia, A., Goites, E., & Díaz, J. (2025). Una solución IoT de bajo costo para la predicción de enfermedades foliares en cultivos agroecológicos a escala agricultura familiar. Experiencia en el periurbano platense. *Revista JAIIO*, 11(3), 138–154. <https://revistas.unlp.edu.ar/JAIIO/article/view/19679>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. *International Journal of Intelligent Networks*, 3, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.09.004>
- Kiehr, M. E., Wolcan, S. M., Noelting, M. C., & Delhey, R. (2024). Enfermedades de las Amarantáceas y otras familias del orden Caryophyllales. In R. Delhey, A. C. Ridao, M. C. Rivera, & S. M. Wolcan (Eds.), *Enfermedades de las hortalizas en Argentina tomo I* (1st ed.). Asociación Argentina de Fitopatólogos.
- Mansoor, S., Iqbal, S., Popescu, S. M., Kim, S. L., Chung, Y. S., & Baek, J.-H. (2025). Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: Trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1587869. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
- Pagano, A., Croce, D., Tinnirello, I., & Vitale, G. (2022). A survey on LoRa for smart agriculture: Current trends and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(23), 23557–23580. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3230505>
- Queiruga, C., Gargoloff, N. A., Kimura, I., Duré, S., Bellante, D., & Tejerina, C. (2024). Codiseño de soluciones informáticas para la agricultura familiar desde la perspectiva de la enseñanza de la Informática y la Agroecología [ISBN 978-950-34-2474-2]. 5° Jornadas sobre las prácticas docentes en la Universidad Pública, 49–58.
- Rangel, L. I., Spanner, R. E., Ebert, M. K., Holtappels, D., Liang, X., De Backer, M., & Thomma, B. P. H. J. (2020). *Cercospora beticola*: The intoxicating lifestyle of the leaf spot pathogen of sugar beet. *Molecular Plant Pathology*, 21(8), 1020–1041. <https://doi.org/10.1111/mpp.12962>
- Singh, R., Aernouts, M., Meyer, M., Weyn, M., & Berkvens, R. (2020). Leveraging LoRaWAN technology for precision agriculture in greenhouses. *Sensors*, 20(7), 1827. <https://doi.org/10.3390/s20071827>