

Modelo integral de riesgo de mildiu en Cesens:

Del potencial invernral (EPI) a la predicción operativa de infecciones

Objetivo

Describir cómo Cesens integra el modelo EPI (potencial invernral de infección) con un flujo completo de maduración → dispersión → infección → incubación (Goidanich) → propagación → infecciones secundarias, transformando datos meteorológicos y de campo en alertas operativas.



1. POR QUÉ UN MODELO “INTEGRAL” DE MILDIU

El mildiu de la vid (Plasmopara viticola) es una enfermedad policíclica: no basta con detectar “un día de riesgo”, sino que el riesgo real **depende de una cadena de procesos:**

(inóculo → dispersión → infección → incubación → esporulación → nuevas infecciones).

En la práctica, un DSS útil debe responder a tres preguntas distintas:

- **¿Con qué riesgo arranca la campaña?** (potencial invernal de inóculo).
- **¿Cuándo se dispara la primera infección?** (maduración, evento de lluvia/temperatura media y humectación).
- **¿Cuándo se puede completar la incubación y reiniciar el ciclo?** (ventanas de propagación y condiciones para infecciones secundarias).

La novedad diferencial en Cesens es que incorpora el **modelo EPI** para cuantificar el “riesgo de partida” al final del invierno, y conectar ese resultado con los umbrales que disparan la dispersión al inicio de campaña.

2. BASE BIOLÓGICA DEL PATÓGENO (RESUMEN OPERATIVO)

Plasmopara viticola es un oomiceto cuya biología está estrechamente ligada a la presencia de agua libre (lluvia, rocío o humectación persistente). El ciclo relevante para la decisión agronómica se resume así:

- **Supervivencia invernal (oosporas):** el patógeno pasa el invierno como oosporas en restos de hojas y en el suelo. La viabilidad del inóculo depende de las condiciones del otoño–invierno.
- **Maduración del inóculo:** conforme avanza el final del invierno, las oosporas maduran y quedan en condiciones de iniciar infecciones.
- **Dispersión (lluvia como disparador):** la lluvia y la humedad movilizan el inóculo y facilitan que el patógeno alcance tejido susceptible.
- **Infección (agua libre + temperatura):** requiere humectación foliar sostenida y temperaturas favorables. El factor clave es cuánto tiempo estuvo la hoja mojada y qué temperaturas acompañaron ese periodo.
- **Incubación:** el patógeno se desarrolla dentro del tejido sin síntomas visibles. Esta fase dura desde pocos días hasta varias semanas según temperatura y humedad.
- **Esporulación y reinicio:** cuando se completa la incubación y se dan condiciones favorables, el patógeno esporula e inicia infecciones secundarias, repitiendo el ciclo varias veces en una misma campaña.

Este marco biológico es la razón por la que Cesens combina un **indicador invernal (EPI)** con reglas de evento (dispersión/infección) y un **modelo de incubación (Goidanich)** para anticipar el momento en que el ciclo puede reiniciarse.

3. NOVEDAD EN CESENS: EPI (POTENCIAL INVERNAL DE INFECCIÓN)

3.1 Qué estima el EPI y por qué importa

El EPI (Energie Potentielle d'Infection) resume el potencial de infección con el que el mildiu puede arrancar una campaña, a partir del comportamiento climático del otoño–invierno. Permite distinguir entre:

- Campañas con inóculo de partida previsiblemente **más agresivo** (mayor probabilidad de que una lluvia relativamente pequeña dispare el primer evento).
- Campañas con inóculo de partida previsiblemente **menos agresivo** (necesitando precipitaciones más altas para el mismo nivel de riesgo).

EPI aporta una lectura de **riesgo estructural de inicio de campaña**, antes de hablar de días de infección.

3.2 Datos y fuentes en Cesens (AEMET + proximidad)

El EPI se calcula con el **histórico de los últimos 20 años** de estaciones **AEMET** cercanas, más los **datos del año en curso** en el periodo **octubre → marzo**, capturando las condiciones reales del último otoño–invierno.

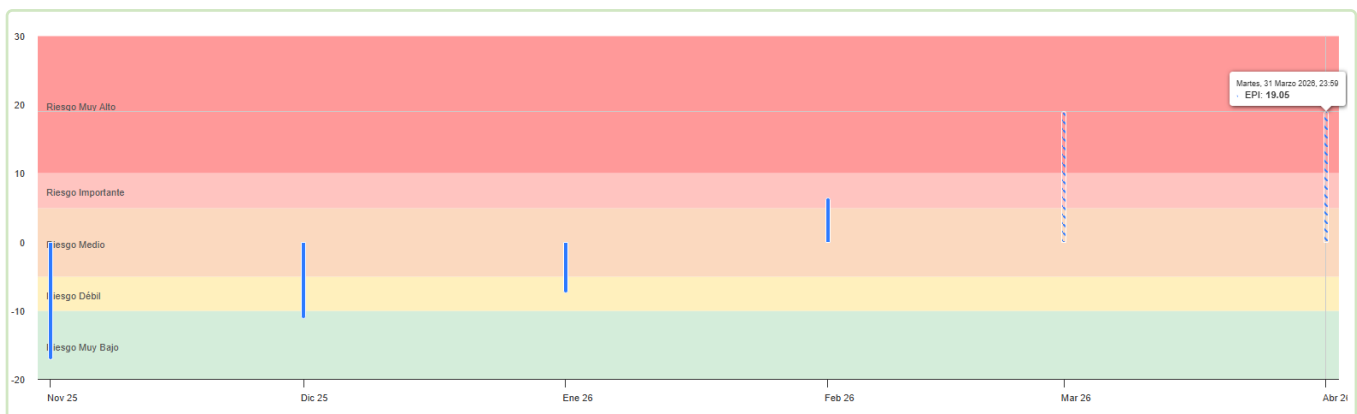
3.3 Qué devuelve el EPI

El resultado es un valor EPI al final del invierno, que Cesens interpreta como **potencial de arranque** para modular la sensibilidad del sistema al inicio de campaña.

3.4 Del EPI a una regla operativa (umbral de lluvia de dispersión)

Cesens traduce el EPI a un umbral de precipitación que desencadena la dispersión bajo la condición:
T media = 12 °C

CONDICIÓN EPI	PRECIP. QUE DESENCADENA DISPERSIÓN
EPI > 10	5 mm
EPI > 5	8 mm
-5 ≤ EPI ≤ 5	10 mm
EPI < -5	12 mm
EPI < -10	15 mm



Interpretación: a mayor EPI, menor precipitación necesaria para disparar un evento de dispersión relevante. En años de potencial bajo, el sistema adopta una postura conservadora y exige mayor precipitación.

3.5 Cómo encaja EPI en el modelo integral Cesens

El EPI **no sustituye** al resto del modelo: **lo condiciona**.

En Cesens se usa como “capa inicial” que:

- Define el **umbral de precipitación** que dispara la dispersión (tabla anterior).
- Prioriza la vigilancia temprana cuando el potencial de arranque es alto.
- Reduce falsos positivos al inicio de campaña en años de potencial invernal bajo.

4. DEL POTENCIAL AL EVENTO: MADURACIÓN, DISPERSIÓN E INFECCIÓN PRIMARIA

4.1 Maduración de oosporas (método térmico)

Cesens utiliza un **método térmico** para estimar cuándo el inóculo invernal entra en fase compatible con el arranque del ciclo:

TEMPERATURA BASE (TB)	UMBRAL DE MADURACIÓN
8 °C	160 °C·día

El sistema acumula (T media – 8 °C) desde inicio del invierno. Al alcanzar 160 °C·día, Cesens considera el inóculo maduro y capaz de responder a un evento de lluvia/humectación.

4.2 Dispersión: umbral condicionado por EPI (T media = 12 °C)

Una vez el inóculo está maduro, Cesens evalúa la **precipitación acumulada** y aplica los umbrales condicionados por EPI:

EPI ALTO	EPI BAJO
Dispersión con menos lluvia (ej.: 5–8 mm).	Necesita más lluvia (ej.: 12–15 mm) para el evento.

4.3 Infección primaria: la importancia de medir humectación foliar

La infección primaria no depende solo de la lluvia: **requiere humectación foliar real** durante tiempo suficiente y en condiciones térmicas favorables. Por eso Cesens recalca la importancia del **sensor LWS**:

CON SENSOR LWS	 <p>Sensor En LWS</p>
El modelo usa la humectación medida directamente para evaluar la ventana de infección y acumular el indicador térmico.	
SIN SENSOR LWS	
Cesens usa proxy: T por debajo del punto de rocío y HR > 85%, para estimar periodos probables de hoja mojada.	

En ambos casos, Cesens aplica el criterio de 50 °C·h (grados-hora) durante periodos de humectación para caracterizar la ventana de riesgo de infección.

5. CUÁNDO INTERVENIR: INCUBACIÓN CON GOIDANICH

5.1 Qué aporta Goidanich

El **modelo de Goidanich** se emplea para estimar la **progresión de la incubación** tras un evento de infección. Su valor práctico es convertir la meteorología posterior a la infección (temperatura y humedad) en una medida de **avance acumulado** de la incubación.

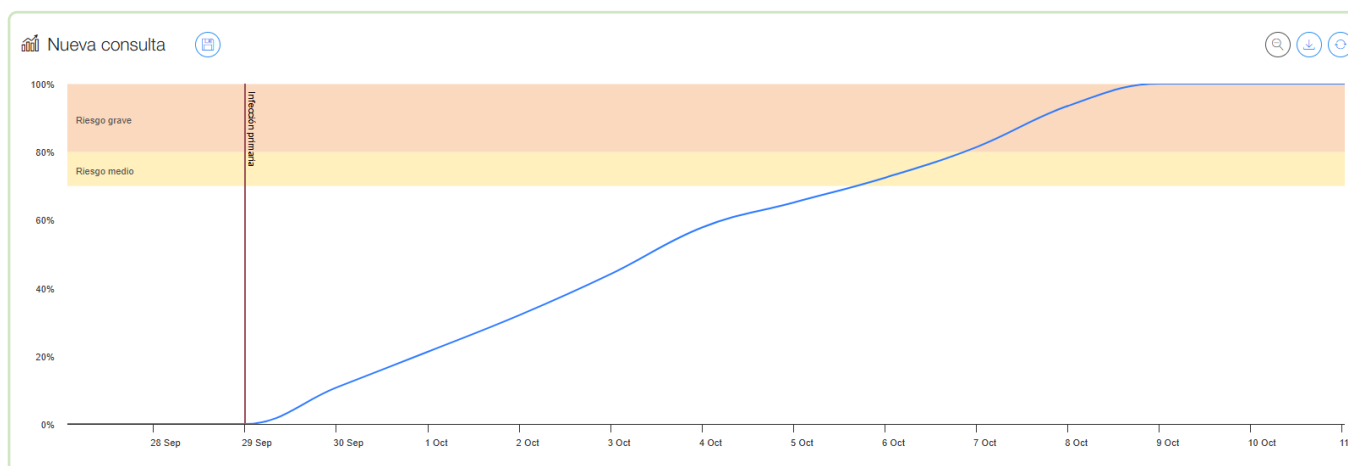
En el flujo Cesens, Goidanich permite responder: "si ya hubo infección, ¿cuándo se aproxima el momento en que la incubación se completa y se abren condiciones para nuevas infecciones?"

5.2 Progreso de incubación

La incubación se representa como un **porcentaje acumulado** (0–100%), actualizado conforme evolucionan las condiciones meteorológicas tras la infección.

5.3 Señal operativa en Cesens: umbral del 70%

Cesens traduce el avance de incubación a una señal operativa clara: el usuario visualiza el progreso y dispone de un **umbral del 70%** como punto de referencia para la toma de decisiones.



6. CICLO SECUNDARIO: PROPAGACIÓN E INFECCIÓN SECUNDARIA AUTOMÁTICA

En mildiu, la fase crítica no termina con la infección primaria: si se completa la incubación y se dan condiciones favorables, el ciclo puede reiniciarse con infecciones secundarias.

6.1 De incubación primaria al disparo secundario

En Cesens, si no se ha registrado un tratamiento destinado a frenar la incubación de la infección primaria, el sistema continúa el seguimiento hasta que la incubación alcanza el 100%. A partir de ahí:

- Si existen condiciones compatibles con el criterio de **50 °C·h (grados-hora)**, Cesens considera que se habilita el escenario de **infección secundaria**, y el disparo es **automático**.

Este comportamiento conecta de forma directa "lo que pasó" (infección + incubación) con "lo que puede pasar después" (reinicio del ciclo).

6.2 Propagación (condición ambiental)

Cesens utiliza la regla de **más de 4 horas con HR > 95%** como condición clave asociada a la **propagación** en la dinámica del patógeno.

6.3 Infección secundaria y viabilidad: uso de ambos umbrales

Para el ciclo secundario, Cesens aplica ambos umbrales complementarios:

- **Umbral de infección (50 °C·h)** durante periodos de humectación (o su proxy cuando no hay sensor LWS).
- **Umbral de no viabilidad asociado a temperaturas altas (p. ej., ≥ 6 horas con T > 30 °C)**, que reduce o anula la capacidad de progresión/viabilidad del ciclo bajo condiciones desfavorables.

La combinación de ambos criterios permite que el DSS sea sensible cuando “hay condiciones reales” y, al mismo tiempo, conservador cuando el entorno es claramente limitante para el patógeno.

7. INTEGRACIÓN EN CESENS: DEL CÁLCULO AL USUARIO

7.1 Datos que alimentan el modelo

El modelo integral se apoya en:

- **Meteorología de estación Cesens** (y, cuando aplica, estaciones públicas cercanas).
- **Histórico AEMET** (20 años) para el cálculo del EPI.
- Sensores clave para calidad del DSS:

Precipitación · Temperatura y HR · Humectación foliar (sensor LWS, especialmente recomendado)

7.2 Salidas: eventos y seguimiento de progresos

Cesens transforma la cadena biológica en señales simples:

SALIDA	DESCRIPCIÓN
EPI invernal	Potencial de arranque al final del invierno
Evento de dispersión	Umbral de precipitación condicionado por EPI y T=12 °C
Riesgo de infección primaria	Humectación + criterio 50 °C·h
Progreso de incubación	Porcentaje 0–100% con umbral operativo al 70%
Infección secundaria automática	Incubación 100% + 50 °C·h, modulado por umbral de no viabilidad

7.3 Registro de tratamientos, “reset” del modelo y días de protección

El registro de tratamientos es una pieza esencial del “modelo integral”, porque permite que el DSS refleje lo que ocurre en campo y evite marcar infecciones secundarias que no van a suceder cuando se ha intervenido a tiempo.

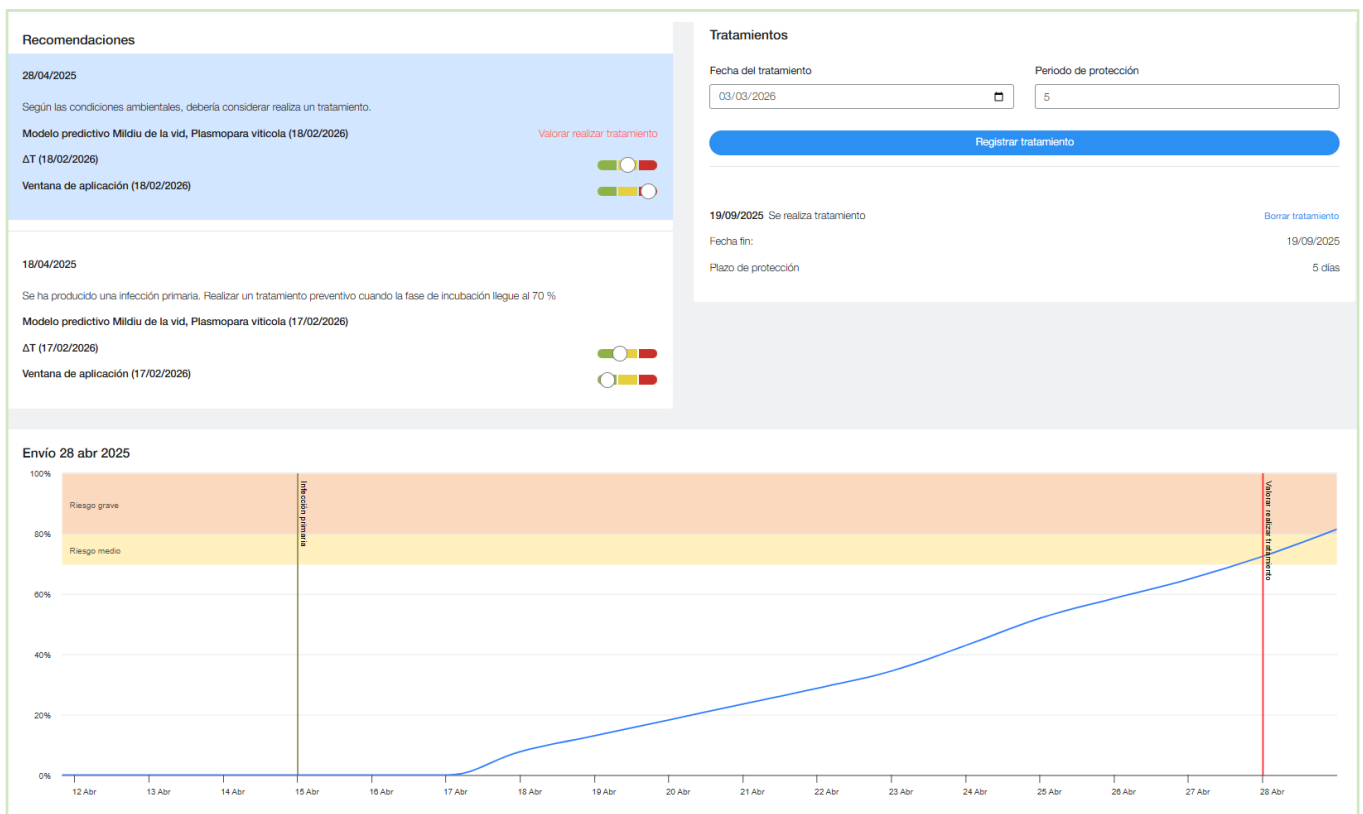
- Cuando el usuario registra un tratamiento fitosanitario al alcanzar el umbral del 70% de incubación, Cesens resetea automáticamente el modelo: el progreso vuelve a 0% y el sistema queda latente.
- A partir de ese momento, el modelo no continúa hacia el 100% (y, por tanto, no “encadena” el ciclo hacia secundarias), sino que espera a que vuelvan a darse las condiciones que disparan una nueva infección (evento de dispersión/infección según las reglas descritas).

Este comportamiento es clave porque, al frenar la incubación y la posterior esporulación mediante el tratamiento, se evita que el DSS proyecte infecciones secundarias que, en la práctica, no existirán.

Días de protección (según producto) En Cesens, el registro de tratamiento puede incorporar días de protección asociados al producto aplicado.

Esto permite modelizar la ventana real de protección del cultivo:

- Si, por ejemplo, se registran 7 días de protección, y 2 días después del tratamiento se dan condiciones meteorológicas compatibles con una infección (dispersión + humectación + 50 °C·h), el sistema considera que el cultivo sigue protegido y no desencadena una nueva infección.
- Una vez finaliza la protección, el modelo vuelve a evaluar con normalidad los eventos de riesgo y solo reactivará el flujo cuando se cumplan de nuevo las condiciones de infección.



8. LÍMITES Y RECOMENDACIONES DE USO

Como cualquier DSS, el rendimiento depende de la calidad de datos y del contexto agronómico. En la práctica, Cesens recomienda:

- Priorizar la instalación de **sensor de humectación foliar** en zonas con alta variabilidad de rocío/niebla o con topografías complejas.
- Revisar la correcta medida de precipitación (especialmente eventos de baja intensidad).
- Usar el DSS como herramienta de **priorización y anticipación**, combinándolo con observación de campo y criterios de manejo.

9. CONCLUSIÓN

El enfoque integral de Cesens combina:

- **EPI** para cuantificar el potencial de inicio de campaña y ajustar **umbrales de precipitación** que disparan la dispersión.
- Una lógica de **infección** basada en humectación (idealmente medida) y el criterio de **50 °C·h**.
- **Goidanich** para convertir meteorología posterior a la infección en **progreso de incubación**, habilitando un seguimiento operativo (umbral 70%) y el encadenamiento hacia **infecciones secundarias automáticas**.

El resultado es un sistema que no se limita a "avisar días de riesgo", sino que modeliza la **dinámica completa del patógeno** para ayudar a decidir con antelación y coherencia biológica.