

Descripción del modelo conceptual **MiRoya**



Contacto: Pierre Bommel (bommel@cirad.fr)

Autores que han participado en el diseño de este modelo

En el marco del proyecto PROCAGICA, el diseño de este modelo requirió un largo trabajo en el que participaron varias personas:

- Jacques Avelino, CIRAD - CATIE
- Edwin Treminio, CATIE
- Pierre Bommel, CIRAD - CATIE
- Grégoire Leclerc, CIRAD - CATIE
- Natacha Motisi, CIRAD - CATIE
- Isabelle Merle, CIRAD - CATIE
- Rémi VEZY, CIRAD

Este trabajo se basa también en el conocimiento de expertos referenciado en numerosos artículos científicos.

Objetivo de MiRoya

El primer objetivo del modelo *MiRoya* es de integrar y probar informaciones científicas y de expertos en un modelo de simulación, para:

- Comprender los mecanismos biofísicos
- Jerarquizar los parámetros que influyen en las epidemias de roya
- Compartir conocimientos,
- Probar hipótesis,
- Probar diferentes medios de control de la roya y
- Consolidar una Red Regional de Gestión de Riesgos en Café (RR-GRC)

El modelo también sirve como simulador interactivo multijugador (Simulacro) para armonizar los niveles de alerta. Para apoyar la organización de juegos serios, este simulador busca promover debates sobre los aspectos socio-económicos de la producción de café en un contexto de crisis de la roya.

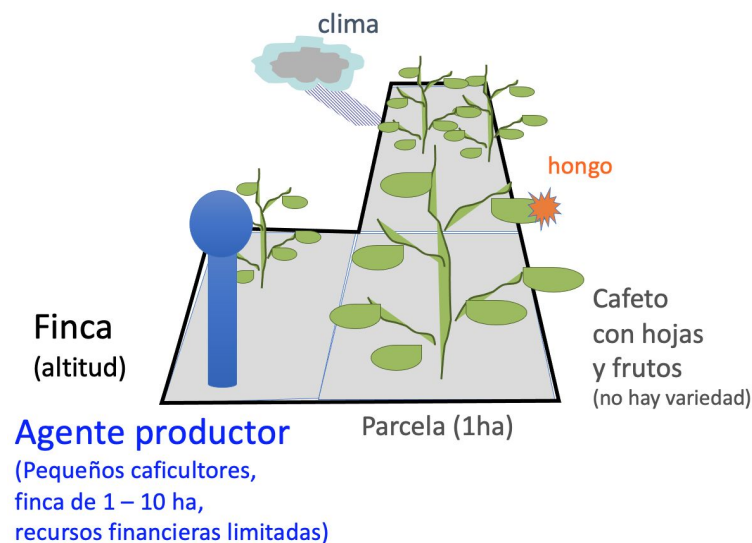
Basado en un modelo del ciclo de vida de la roya y de los cafetos, este modelo simula la producción de café según las condiciones climáticas, las enfermedades debidas a la roya y los tratamientos aplicados por los agentes productores.

Dirigido a técnicos y gerentes de institutos cafeteros, el objetivo de este juego es doble: 1°) Facilitar la armonización de las alertas y de las acciones al nivel institucional; 2°) Generar recomendaciones efectivas y oportunas para los pequeños productores con recursos financieros limitados.

Al señalar la importancia de la comunicación entre los países, este modelo también tiene como objetivo estructurar una red regional de institutos meteorológicos y agronómicos. A fin de encontrar estrategias de prevención y control adaptables, también es necesario que los países intercambien información sobre los niveles de gravedad de la roya.

Estructura del modelo

El modelo conceptual se representa como en forma simple :



Un pequeño caficultor maneja una finca de cafetos afectados por un clima local pero también por la roya.

El diagrama de clase siguiente:

Estructura del modelo (Diag. de clases)

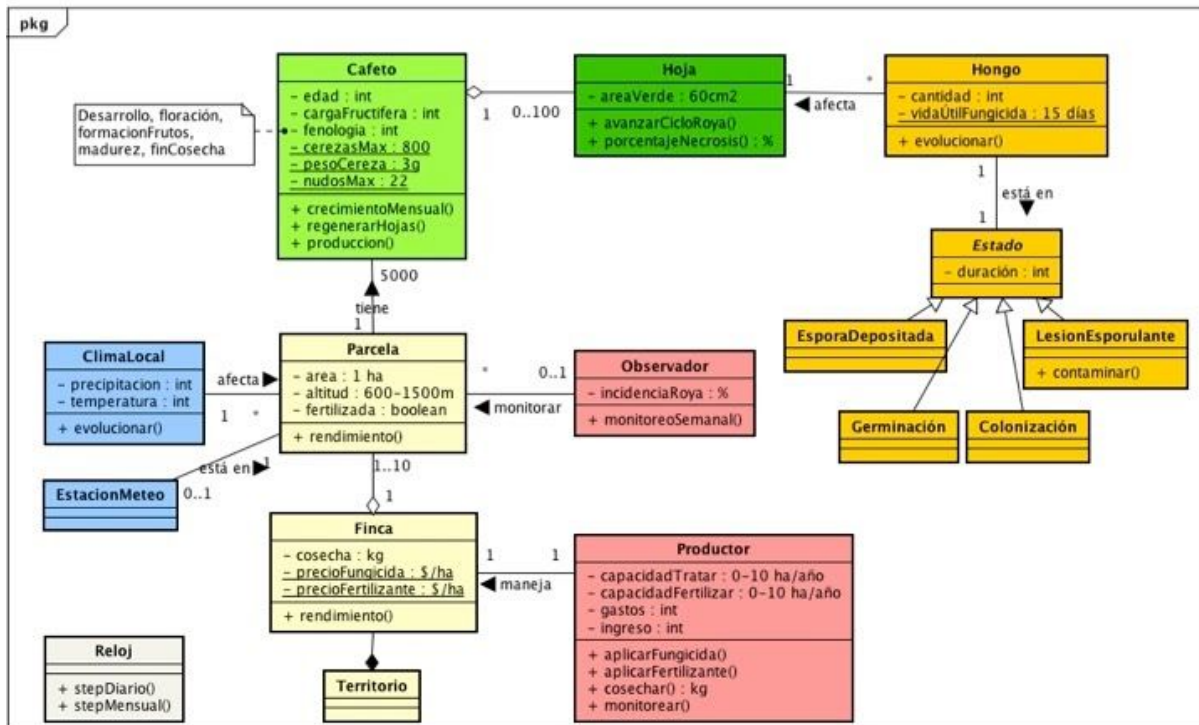


Fig. 5: Diagrama de clase UML del modelo conceptual

Un productor maneja una finca compuesta por parcelas afectadas por un clima local. En una parcela hay un cafeto, que representa un grupo de cafetos. Contiene hojas cuyo número puede fluctuar con el tiempo. En el momento de la cosecha, produce frutos.

Cada hoja es susceptible de ser infectada por la roya. Se encuentra primero en forma de esporas depositadas. Si las condiciones lo permiten, las esporas germinan y penetran en la hoja para convertirse en lesiones. Tras un periodo de latencia, las lesiones se convierten en lesiones esporulantes que emiten esporas.

Ya que en realidad hay millones de esporas liberadas en un momento dado, es imposible implementar tal modelo de manera computarizada. Los 4 posibles estados del hongo de la roya se describen, por lo tanto, mediante 4 atributos definidos a nivel de cada hoja:

1. *numDeposiciones*: un número de esporas depositadas en una hoja,
2. *numGerminaciones*: un número de esporas germinadas en una hoja,
3. *numColonizaciones*: un vector de números de lesiones no esporulantes en una hoja,
4. *numPustulas*: un vector de números de lesiones esporulantes en una hoja.

Entonces, en vez de manipular objetos (instancias de Hongos), hay 4 variables: 2 variables simples (números enteros) y 2 tablas numéricas. Las tablas (o vectores) representan el número de lesiones y sus edades (de maximum 51 o 78 días). La evolución y el envejecimiento de cada lesión se simula de la siguiente manera: cada lesión avanza de 1 hasta 3 steps cada día, en función de las condiciones climáticas. Significa que una lesión no esporulante puede estar en este estado de 14 días (en el mejor caso) hasta 42 días (en el peor caso climático). (Hongo *duracionMaxLatencia* = 42 días). El mismo procedimiento se aplica a las lesiones esporulantes :

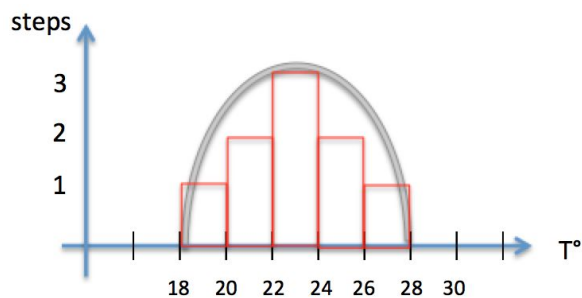


Fig. 6: Tasa de envejecimiento de una lesión en función de la temperatura

$22 < T < 24 \Rightarrow 3 \text{ steps}$
 $20 < T < 26 \Rightarrow 2 \text{ steps}$
 $18 < T < 28 \Rightarrow 1 \text{ step, si no} \Rightarrow 0$

Por consiguiente, el modelo conceptual adecuado para la aplicación es el siguiente:

Estructura del modelo (IMPLEMENTACIÓN)

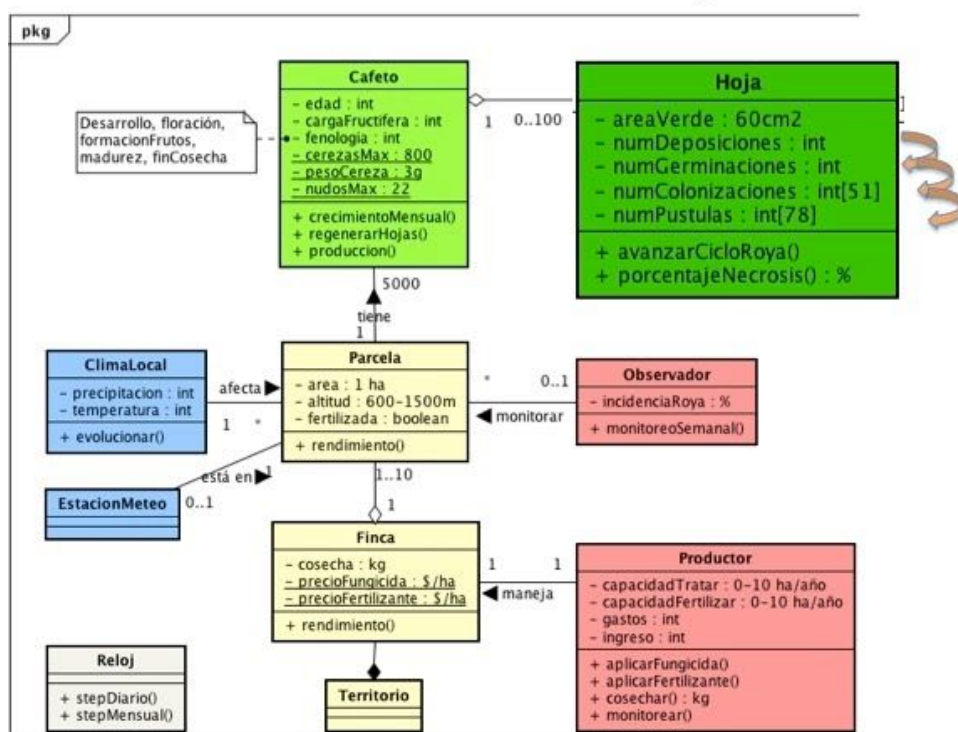


Fig. 7: Diagrama de clase UML del modelo implementado

Dinámicas del modelo

Tiempo

En la versión actual, el paso de tiempo (step) es igual a una semana (stepSemanal). Pero de hecho, la granularidad mínima es el día (stepDiario). Por lo tanto, el paso semanal ejecuta 7 veces un pasoDiario.

Este diagrama de secuencia representa la activación de las entidades diariamente:

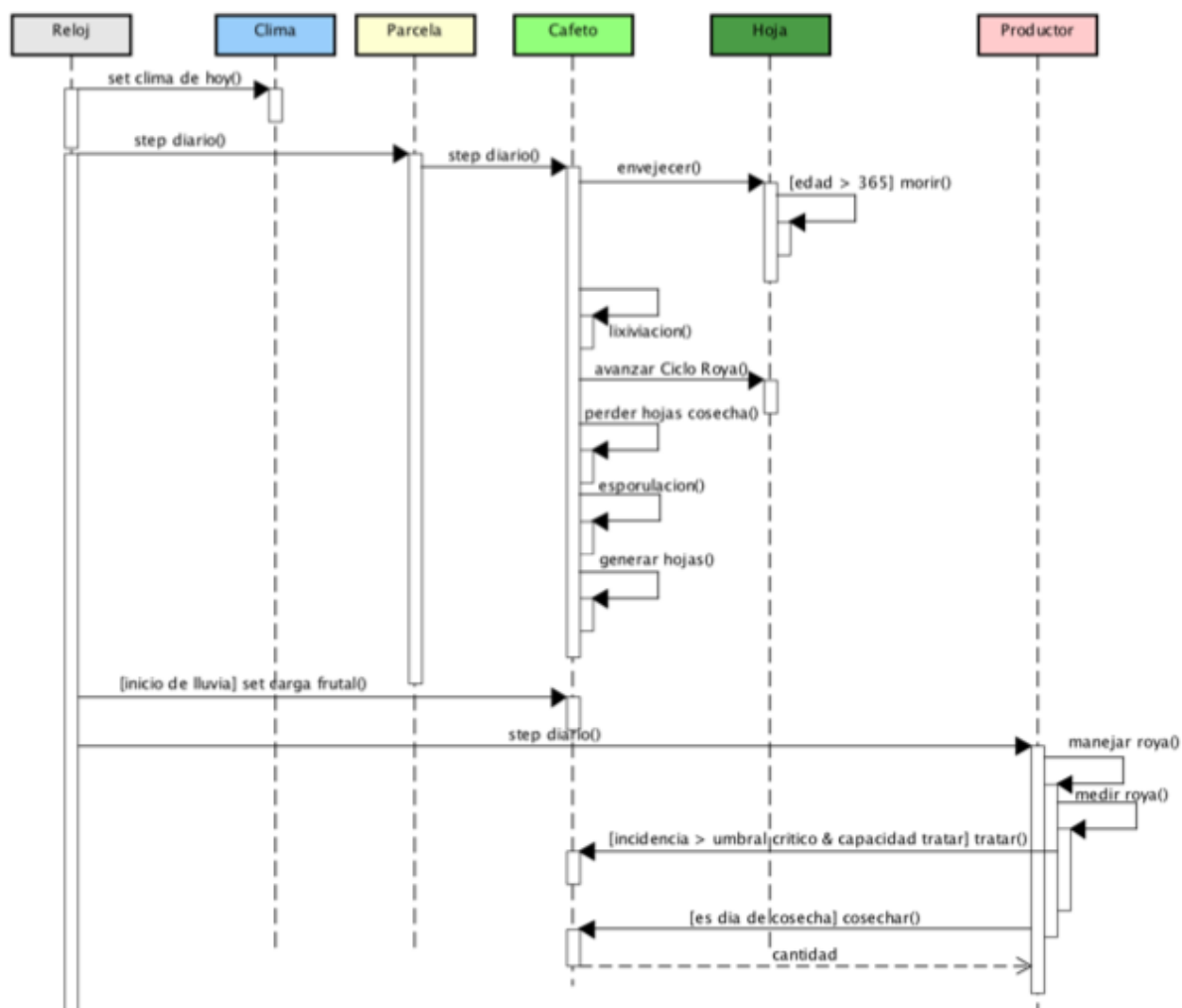


Fig. 8: Diagrama de secuencia UML del modelo (step diario). Esta secuencia no presenta el escenario con la activación del observador para la vigilancia de la roya.

Ciclo de vida de la roya

El siguiente diagrama de estado-transición (UML) representa el ciclo de vida de la Roya. Los 4 estados son: Espora depositada (en una hoja), Espora Germinada (con su apresorium), Lesión no Esporulante (llamada “Colonización”) y Lesión Esporulante (llamada “Pustula”). Estos dos últimos estados se encuentran dentro de la hoja.

El cambio de estado (la transición) se activa por un evento. En la mayoría de los casos, estas transiciones son activadas por eventos climáticos.

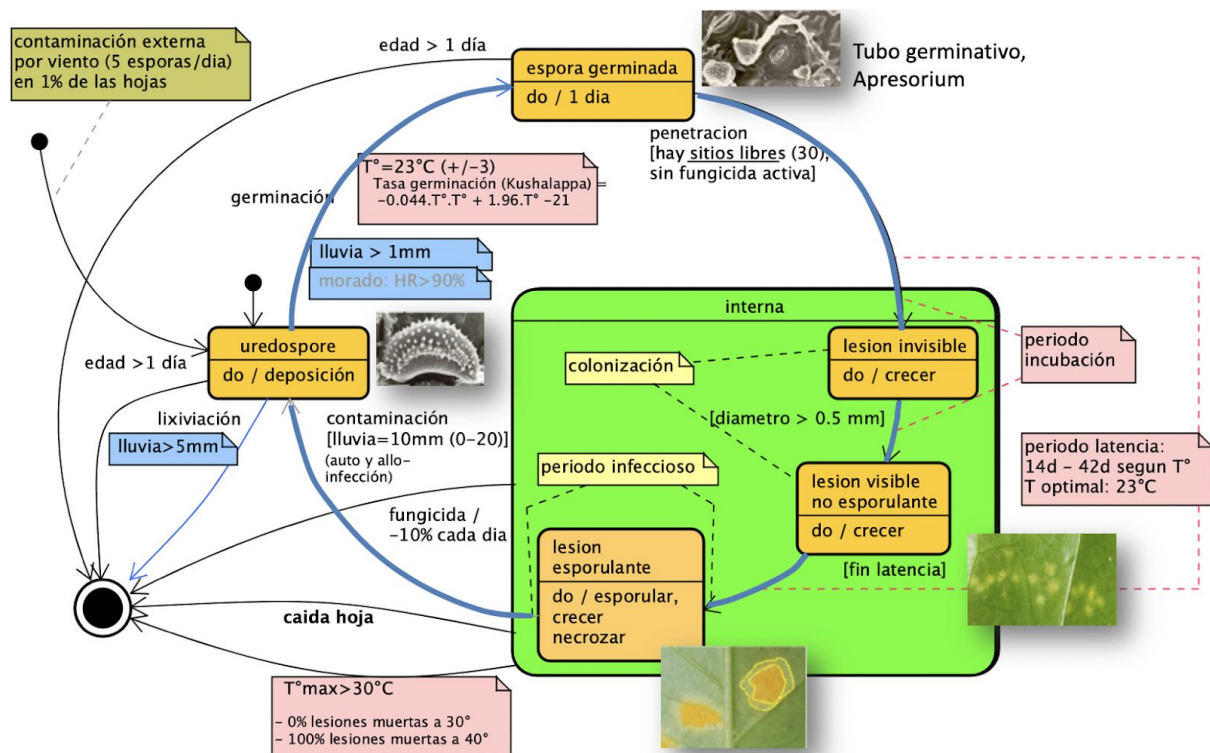


Fig. 9: Diagrama de estado-transición UML del ciclo de la roya

Como se explicó anteriormente, no hay instancias de Hongos, pero hay 4 variables: *numDeposiciones*, *numGerminaciones*, *numColonizaciones* y *numPustulas*. La traducción del diagrama de estado-transición en implementación de la roya se explica de acuerdo con el siguiente esquema:

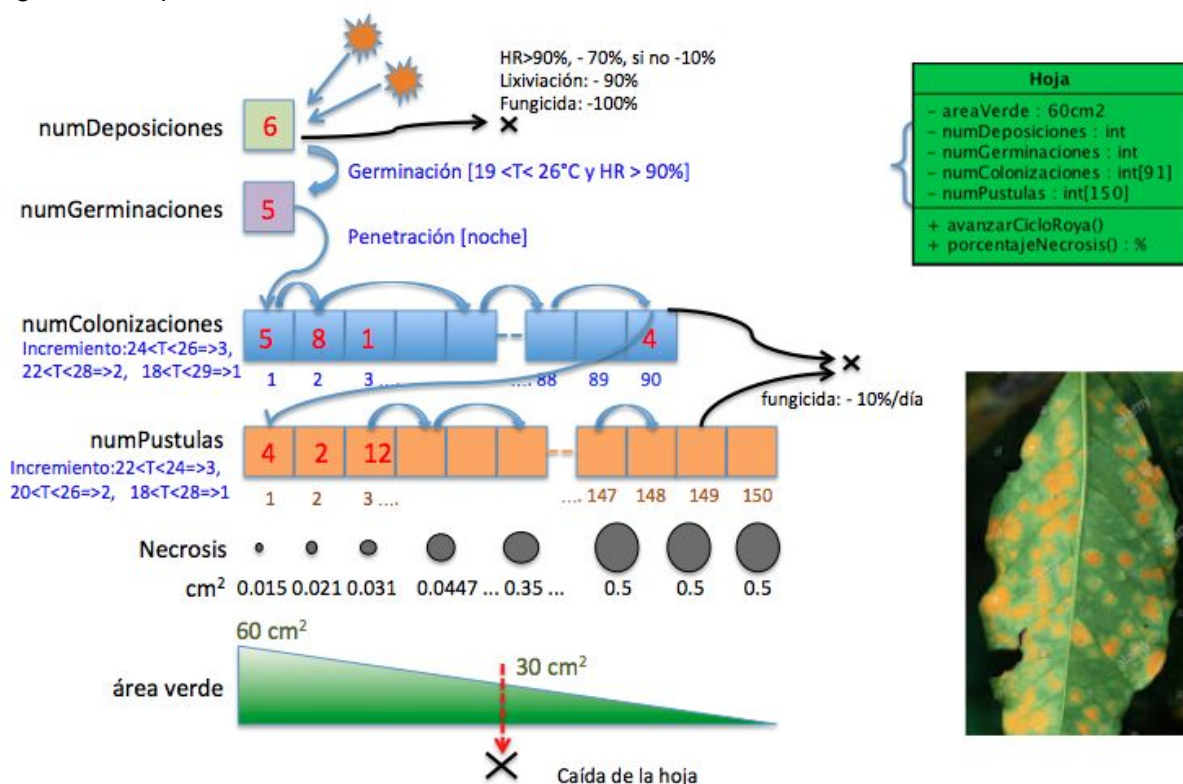


Fig. 10: La evolución de la roya en y dentro de la hoja

Todas las esporas que se depositan en una hoja son representadas por un número: *numDeposiciones*. Cuando las condiciones climáticas le permiten, una parte de estas esporas van a germinar. En este caso, el valor de *numDeposiciones* se reduce a favor de la variable *numGerminaciones*. Si las condiciones lo permiten, el contenido de la variable *numGerminaciones* se transfiere y se acumula a la primera célula del vector *numColonizaciones*. En función del clima, se calcula un índice de crecimiento de las colonias. Este índice (llamado *díasDeAvanzo*) permite avanzar cada elemento del vector de 1 a 3 casillas dependiendo del clima: 3 *díasDeAvanzo* cuando la temperatura está cerca de un óptimo (23°C); 2, 1 o 0 cuanto más lejos del óptimo (cf. Fig. 3).

En siguiente, la lista de los eventos presentados en el ciclo de vida (Fig. 6) se detallan.

Contaminación

Las esporas depositadas en una hoja provienen de 3 fuentes de infección: la auto-infección y la alo-infección del mismo árbol y la infección por viento.

Auto-infección:

Una hoja con lesiones esporulantes se auto-infecta. Se considera 58000 esporas emitidas por cm² de lesión esporulante (Merle et al. 2019).

Si la precipitación del día es mayor a 20 mm, las esporas son eliminadas. Entre 10 y 20 mm de precipitación, la proporción óptima de depósito es de 2 a 10% de la precipitación. Entre 0 y 10 mm, la proporción óptima de depósito es el 10% de la precipitación.

Alo-infección por las hojas vecinas del mismo árbol:

Sólo el 10% de la misma proporción (del cálculo utilizado anteriormente) se depositan en las hojas vecinas de la hoja que contiene lesiones esporuladas.

infección externa por viento

Además de estos dos procesos, cada día, 1% de las hojas del árbol aleatoriamente recibe 5 esporas del exterior.

Lixiviación

En la versión actual, se considera solamente sistema sin sombra.

Cuando hay mucha lluvia (> 5 mm/día: Cafeto umbralLixiviacion), se elimina 90% de las esporas depositadas en todas las hojas (pérdidaPorLixiviacion: 90%).

Germinación

En el laboratorio, la viabilidad de las esporas es muy baja después de 15 días de almacenamiento. En condiciones naturales, este tiempo se reduce aún más. Una vez depositada, la espora tiene muy poco tiempo para germinar y penetrar. Si las condiciones son húmedas, lo hace en 48 horas, siempre que haya agua abierta. Si las condiciones no son buenas para la germinación y la penetración (es decir, menos de 6 horas de humedad), la espora comienza a germinar pero no completa el proceso y muere.

Según Kushalappa, el porcentaje de germinación es una función cuadrática de la temperatura (T):

$$\% \text{ germinacion} = a.T^2 + b.T + c = -0.044087.T^2 + 1.964224.T - 21.016217$$

Para tener en cuenta la humedad, consideramos que esta ecuación sólo es aplicable si la precipitación es superior a 1 mm.

Penetración

La penetración dura de 1 a 5 horas en la noche, pero no todas las esporas germinadas pueden entrar. Sólo se dispone de 30 sitios de infección por hoja. Entonces la integración de nuevas lesiones en la hoja se limita al número de sitios disponibles, sabiendo que cada lesión no esporádica y esporádica ocupa 1 sitio.

Período de latencia y de esporulación

Como se explicó anteriormente, en función del clima, se calcula un índice de crecimiento de las colonias. Este índice (llamado *díasDeAvanzo*) permite avanzar cada elemento del vector de 1 a 3 casillas dependiendo del clima: 3 *díasDeAvanzo* cuando la temperatura está cerca de un óptimo (23°C); 2, 1 o 0 cuanto más lejos del óptimo (cf. Fig. 3).

Esporulación

Para salir del estado “no esporulante” al estado “esporulante” (o pústula), las lesiones tienen que esperar entre 14 hasta 42 días de acuerdo con las condiciones climáticas. Durante este período, ellas no afectan la hoja (no es el caso en realidad).

A 23°C (temperatura ideal), cada lesión salta 3 días de avance. Con esta temperatura, necesita de 14 días para entrar en el estado pústula. Cuando la temperatura es menor de 18°C o mayor de 28°C, necesita de 42 días para convertirse en pústula.

Duración de la lesión esporulante

El proceso de avanzar en los días de lesión esporulante es parecido a lo de lesión no esporulante, excepto que la duración puede ser más grande (hasta 150 días). Entonces, cuando la temperatura es menor de 18° o mayor de 28°, una lesión esporulante puede vivir hasta 150 días.

Mortalidad por alta temperatura

El exceso de temperatura mata las lesiones. El modelo considera que una temperatura máxima del aire por encima de los 30°C es excesiva. A 40°C, todas las lesiones de una hoja mueren. Entre estas dos temperaturas, la tasa de mortalidad es una función lineal (mortalidad = 0% a 30° - 100% a 40°C).

(Cf. Ribeiro et al. 1978: Efeito de alta temperatura no desenvolvimento de Hemileia Vastatrix em cafee suscetivel. Bragantia, Revista Cientifica do Instituto Agronomico do Estado de Sao Paulo).

Dinamica del Cafeto

En la versión actual, no se tiene en cuenta el crecimiento del cafeto. Sólo se consideran los cafetos adultos. Sólo se tiene en cuenta la generación (y caída) de hojas y frutos.

Diagrama de actividad del cafeto

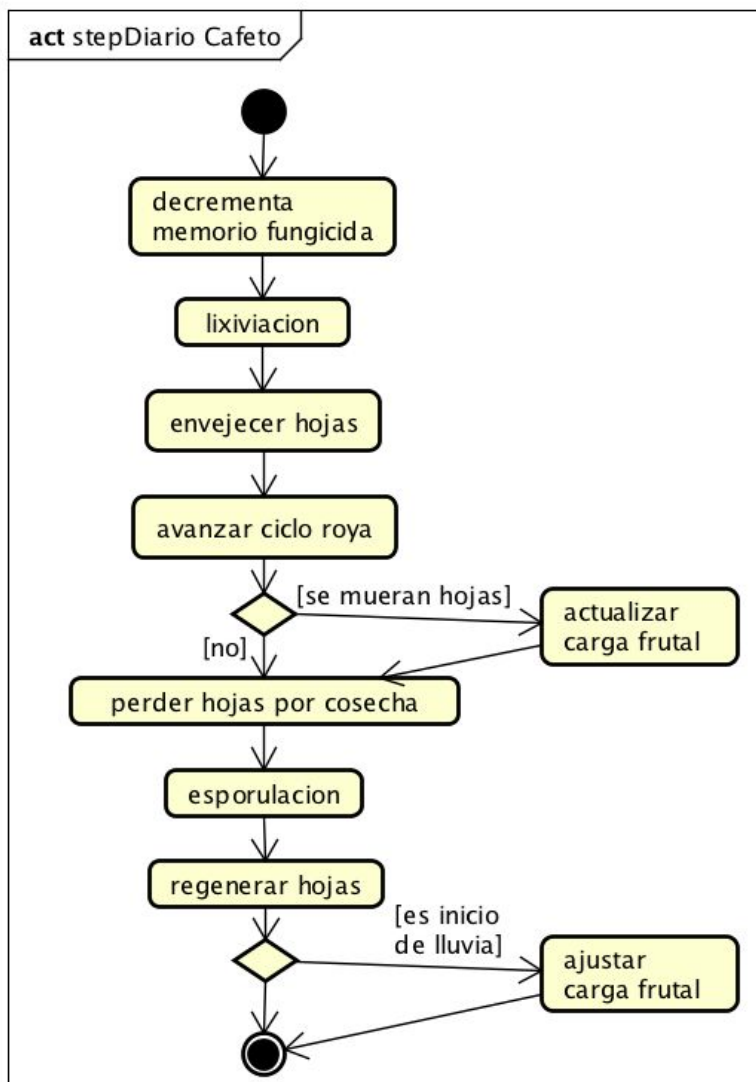


Fig. 11: Diagrama de actividad del cafeto

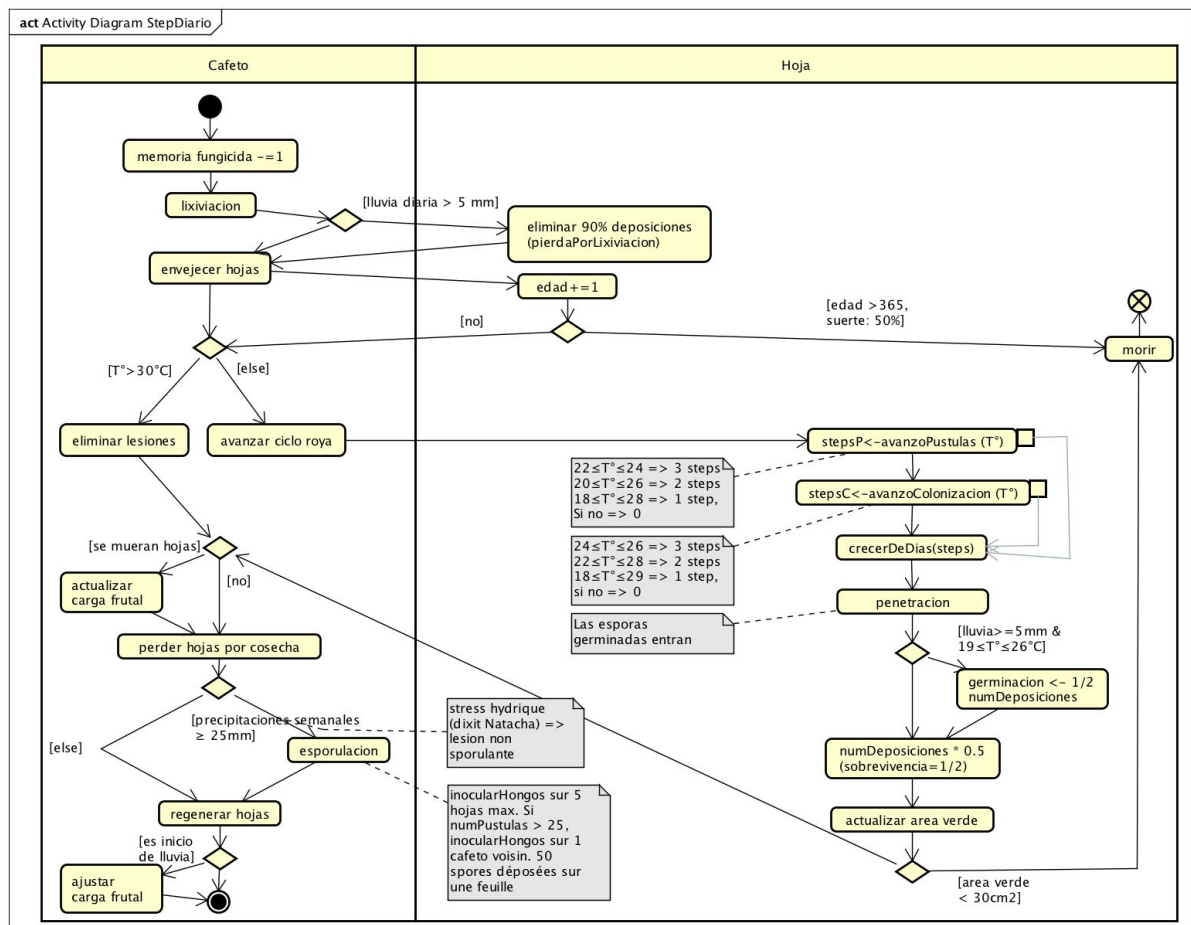
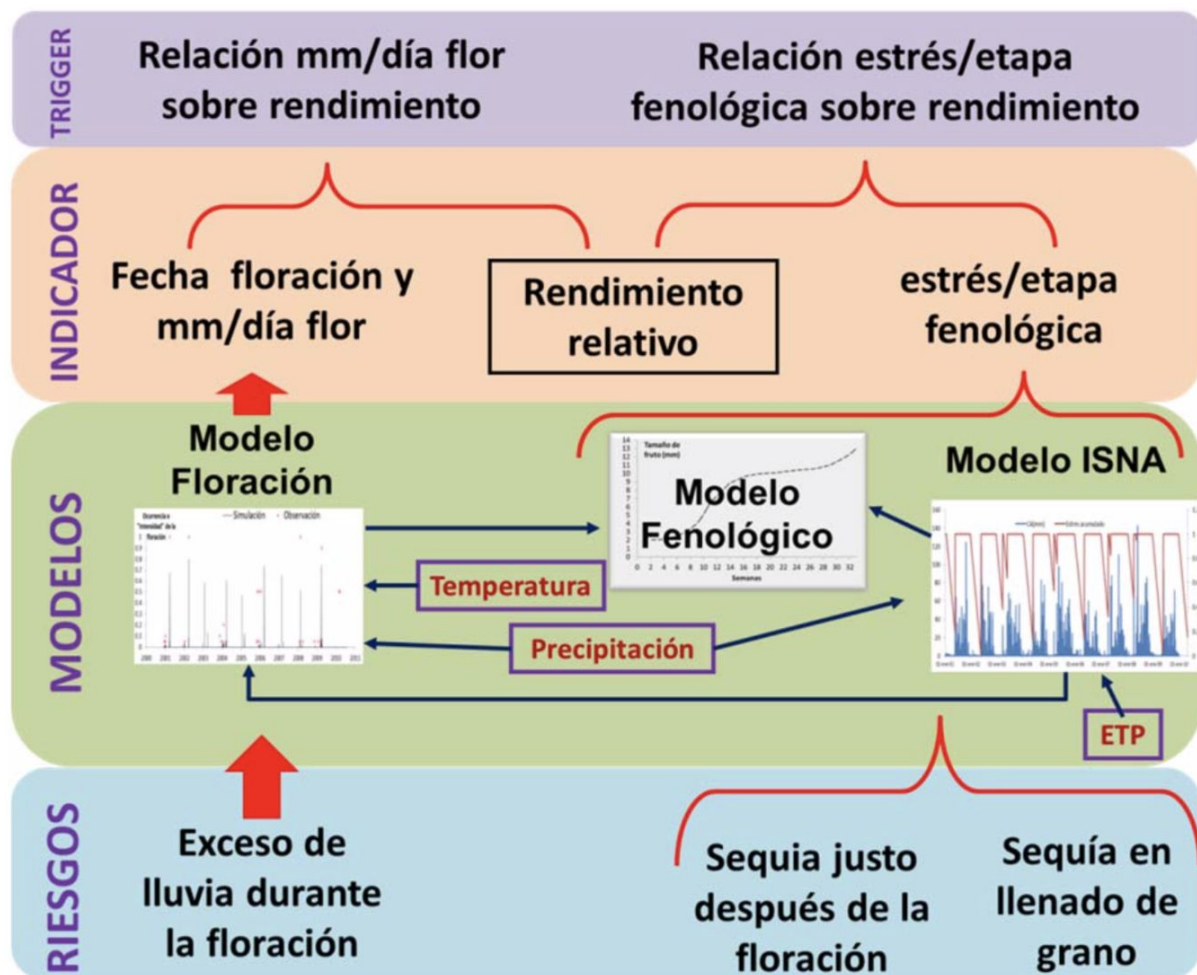


Fig. 12: Diagrama de actividad del cafeto y hoja (swimlanes)

Fenología del cafeto



From: Leonel Lara, Bruno Rapidel, Dietmar Stoian, Jessenia Argüello, Thelma Gaitán, Claudia González, 2011. Estudio de factibilidad para la implementación de seguros basados en Índices climáticos en el cultivo de café en Honduras y Nicaragua. Technical Report · May 2011 DOI: 10.13140/RG.2.1.3976.9364

En el modelo, hay 4 estados:

- Floración: durante la 1a semana de la lluvia. La carga frutal maximal es calculada a este momento (a partir de la area verde del cafeto)
- Madurez: se acumula la temperatura (el $\Delta T^\circ = T^\circ > 10^\circ\text{C}$) hasta la madurez
- Cosecha = cuando $\text{temperaturaAcumulada} > \text{umbralMadurez}$ (3000°C)
- Desarrollo: de la cosecha hasta la floración.

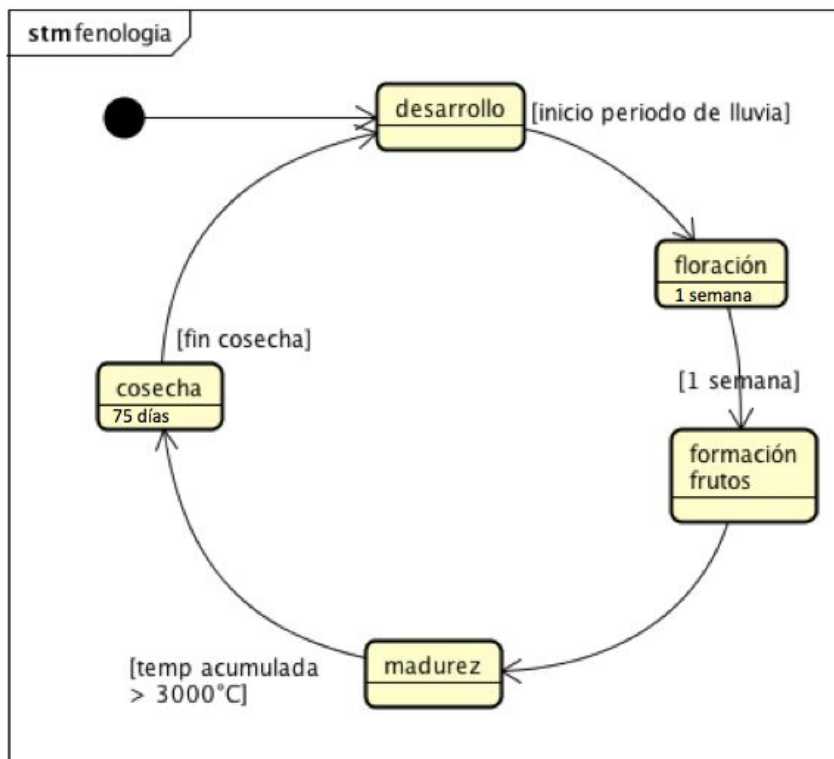


Fig. 13. Dinámica de la fenología

En la primera versión, el estado era un atributo del Cafeto. Pero hoy en día, el estado es un atributo de cada hoja porque dependiendo de las localidades y climas, un cafeto puede tener varios estados al mismo tiempo (frutos maduros y flores nuevas) ! Las flores aparecen en los nodos donde las hojas están en estado de desarrollo.

En el momento de la cosecha, sólo las hojas maduras con temperaturaAcumulada > 3000° se consideran "fructíferas", lo que da un porcentaje de la cosecha en relación con un óptimo (100 frutos). Ejemplo de El Salvador :

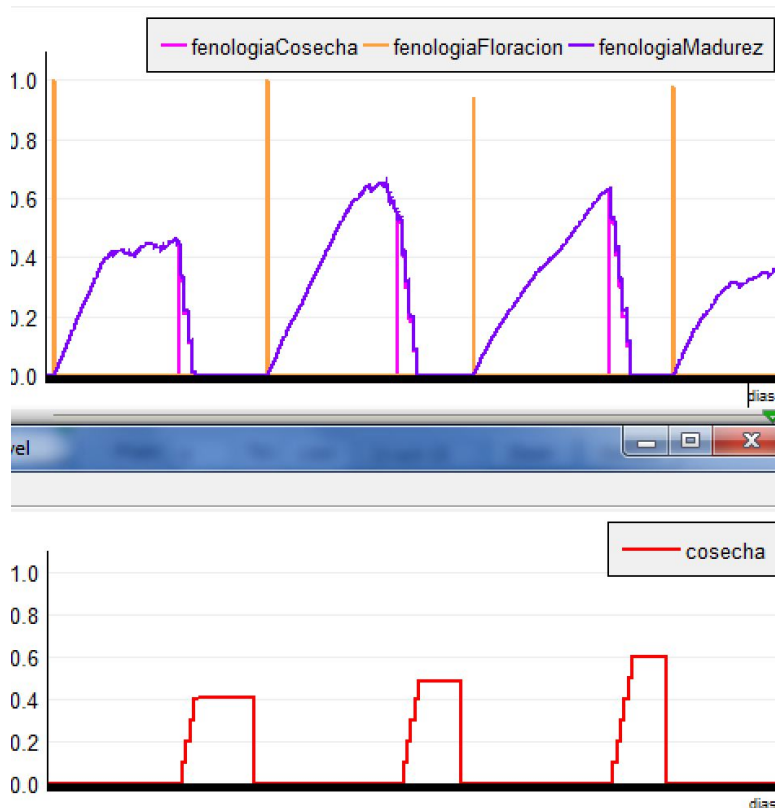


Fig. 14. Dinámica de la fenología y de la cosecha en 3 años de simulación

Regeneración de hojas

Cuando las precipitaciones semanales son mayores de 50 mm, entonces se generan 20 hojas nuevas.

Entre 20 y 50 mm/semana, se generan 10 hojas.

De lo contrario, sólo se crean 5 hojas por mes.

Caída de las hojas

Caída de hojas viejas

La esperanza de vida de una hoja es de 450 días. Más allá de eso, cada hoja tiene un 50% de posibilidades de morir.

Caída de hojas por cosecha

Cada árbol pierde hojas solamente durante el periodo de la cosecha (oct - dic): 10 hojas / mes.

Caída de hojas por roya

La Caída de las hojas sigue una simple ecuación estadística que depende de la incidencia de la roya:

$$\text{tasa de defoliación diaria: } y = 0.0144 / \text{dia} / \text{incidencia};$$

Eso es el 10.08 % de las hojas infectadas que mueren cada semana.

El café pierde x hojas, las más afectadas (con lesiones esporulantes o no).

Acciones de la fungicida

El día del tratamiento, todas las esporas depositadas y germinadas son eliminadas (100%). Los 30 días siguientes, -10% de las lesiones esporulantes y no esporulantes son eliminadas por día, durante la Vida Útil del Fungicida (30 días).

Durante este periodo, no hay esporulación : hay algunas pústulas (disminuyendo) y la incidencia no cae súbitamente, pero no producen esporas.

Comparación de un cafeto en 2 simulaciones: arriba con tratamiento (en t=652), abajo sin tratamiento; gráficos a la izquierda: pustulas/cafeto ; a la derecha: pustulas/hoja

- Num Pustulas del cafeto

- Num pustulas por hoja

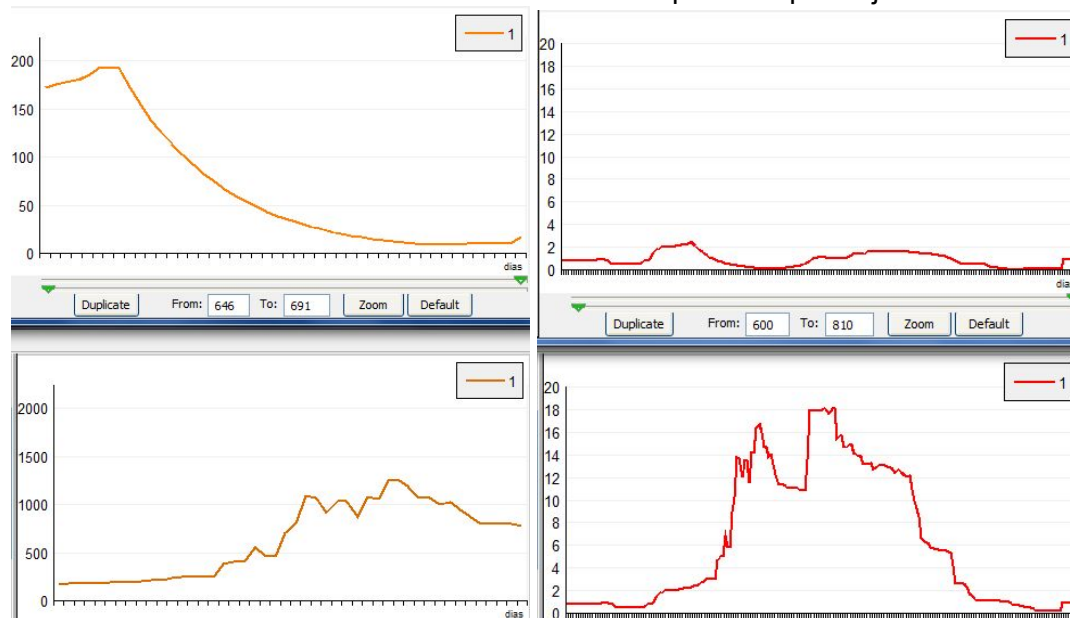


Fig. 15. Números de pústulas por cafeto (izquierda) y por hoja (derecha), con tratamiento (arriba) o sin tratamiento (bajo).

Efecto sobre la incidencia:

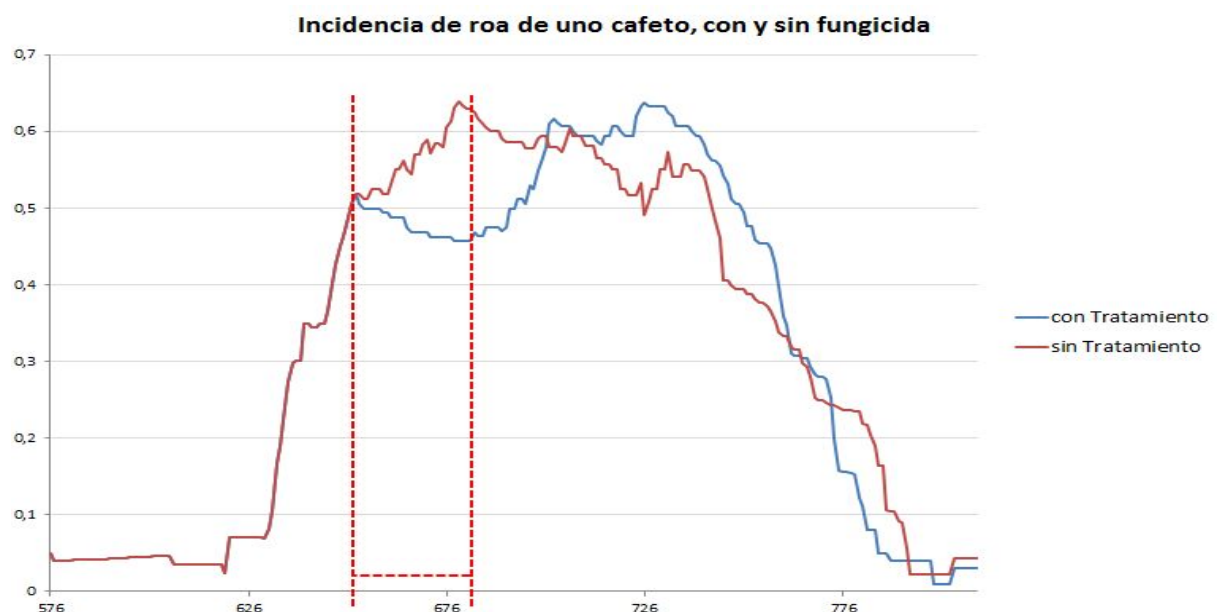


Fig. 16. Dinámica de la incidencia de roya simulada, sin tratamiento y con tratamiento

Comprobando la consistencia de los diferentes steps (diario, semanal, mensual)

El step básico de MiRoya es el día (*stepDiario*). Pero hay posibilidad de simular con step semanal o mensual. En estos casos, el step diario está repetido X veces, pero los indicadores (probes) están medidos solamente al ultimo día del step.

Las siguientes 3 curvas muestran la precipitación diaria según las 3 modalidades :

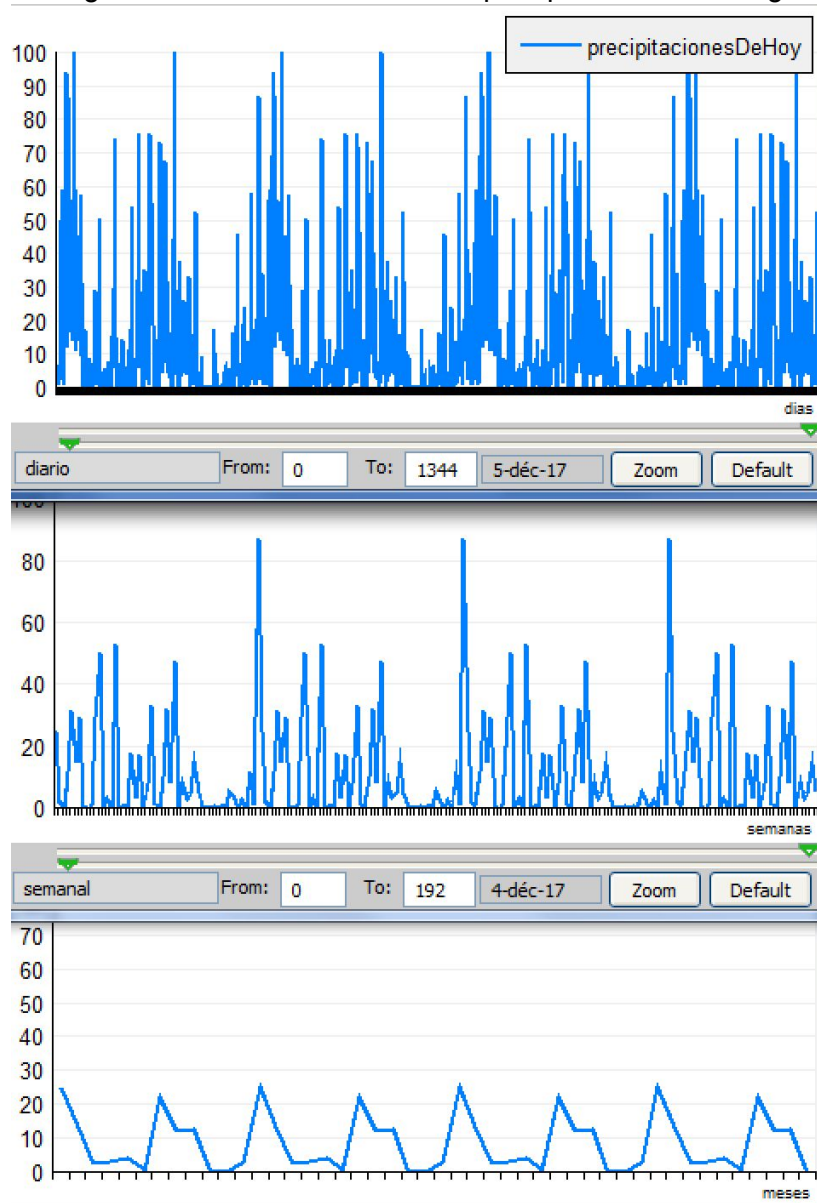


Fig. 17. Indicadores de lluvia según 3 diferentes steps (diario, semanal, mensual) en 4 años de simulación

Ej con *precipitacionSemanal* e *incidenciaRoya* (arriba= diario, medio= semanal, abajo= mensual):

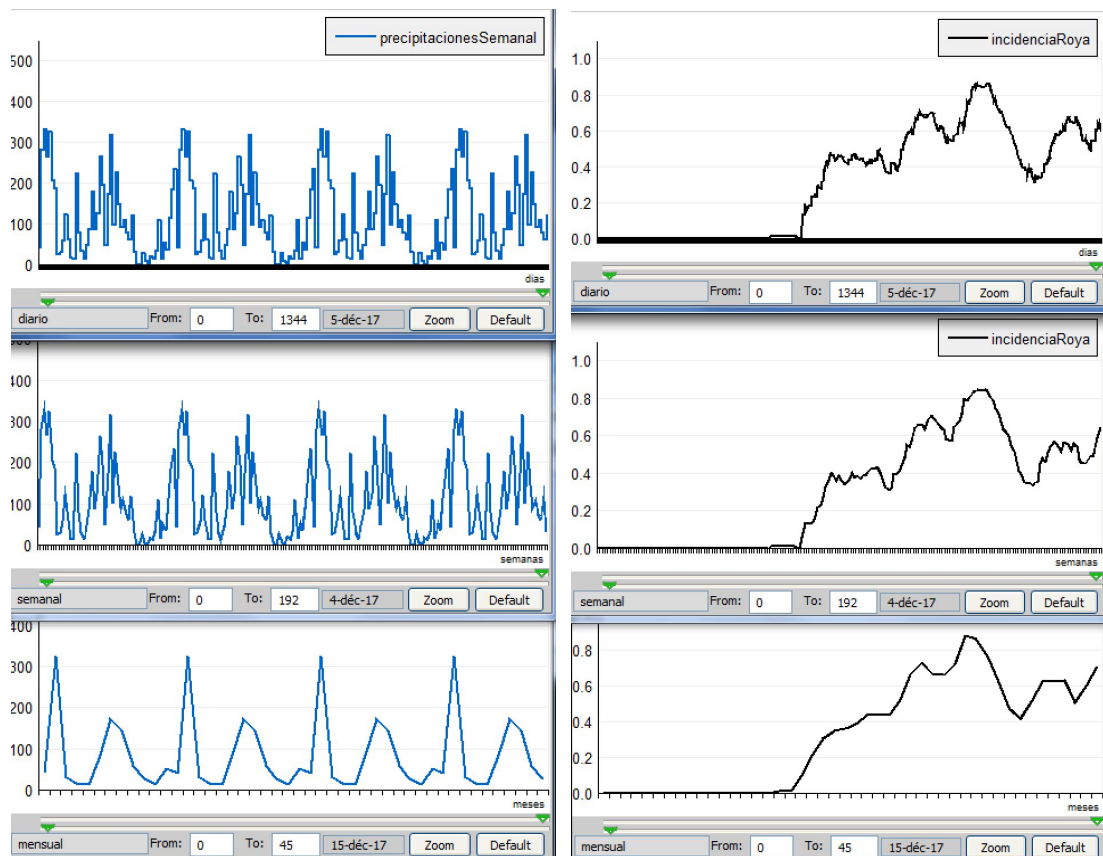


Fig. 18. Indicadores de lluvia y de la incidencia de roya según 3 diferentes steps (diario, semanal, mensual) en 4 años de simulación

Las simulaciones con step mensual corren más rápidamente, pero los indicadores se suavizan y a veces no muestran suficiente información. Pero al mismo tiempo, también muestra la diferencia entre una medición de la roya diaria y mensual.

Step diario vs Step semanal

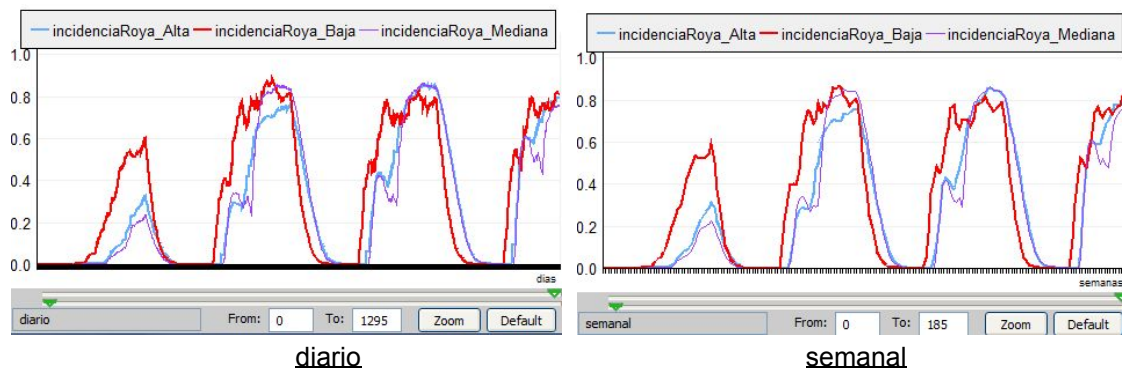


Fig. 19. Indicadores de incidencia de roya según 2 diferentes steps (diario y semanal) en 4 años de simulación

Clima local

Cada parcela de una finca está situada a una determinada altitud. Además, una estación meteorológica se encuentra en este pequeño territorio. Esta estación no simula el clima,

sino que recupera sus datos de un archivo (en formato CSV). Para cada parcela, los datos meteorológicos se calculan según la diferencia de altitud con la estación. Un archivo debe contener por cada día, la T° diaria, T° min, T° max y las precipitaciones (mm/día). Estas “variables de forzamiento” se adaptan a la altitud de cada parcela.