



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE FITOSANIDAD

FITOPATOLOGÍA

Modelo de Infección y desarrollo de *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* Eriks en Guanajuato

CARLOS CUÉLLAR ZAMBRANO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis titulada: **Modelo de Infección y desarrollo de *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* Eriks en Guanajuato** realizada por el alumno: **Carlos Cuéllar Zambrano** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
FITOPATOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. José Sergio Sandoval Islas

ASESOR



Dr. Juan Ángel Quijano Carranza

ASESOR



Dr. Mauro Zamora Díaz

ASESOR



Dr. René Gómez Mercado

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Abril de 2015

MODELO DE INFECCIÓN Y DESARROLLO DE *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*
ERIKS EN GUANAJUATO

Carlos Cuéllar Zambrano, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

La roya lineal de la cebada (*Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*) es una de las principales enfermedades en El Bajío, debido a que el cultivo se establece en el ciclo de riego otoño-invierno. Los esquemas de manejo integrado en la actualidad no cuentan con suficiente información para sustentar el empleo de productos químicos para controlar la enfermedad. Se elaboró un modelo de simulación que calcula el inicio de la infección y el desarrollo de la enfermedad, para contar con una herramienta que permita implementar medidas de control de una manera más oportuna y mejor informada. El estudio se llevó a cabo en el INIFAP-CEBAJ, en Celaya, Guanajuato, durante los ciclos otoño-invierno 2010, 2011, 2012 y 2013, se evaluaron las severidades de los genotipos Apizaco, Alina, Armida y Esperanza. El modelo calcula la infección cuando se cumplen los requerimientos del patógeno ($T^{\circ} \leq 11^{\circ}C$, $HR \geq 80\%$), con datos de clima diarios, además de estimar la severidad en términos de porcentaje de tejido infectado. Al hacer la comparación de las estimaciones del modelo con los datos de campo se encontró una alta relación, lo cual indica que el modelo se puede utilizar de manera confiable. El estudio de riesgo realizado mostró que las condiciones para infección de roya se presentan al menos diez días en el mes de febrero con una probabilidad del 80%, un riesgo muy alto considerando que la mayor parte de las siembras en El Bajío son en diciembre.

Palabras clave: roya lineal, modelo simulación, *Hordeum vulgare*, *Puccinia striiformis*.

MODEL OF INFECTION AND DEVELOPMENT OF *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*
ERIKS IN GUANAJUATO

Carlos Cuéllar Zambrano, M.Sc.
Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

The barley stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*) is one of the major diseases in El Bajío, because the crop is set to the watering cycle autumn-winter. Integrated management schemes currently do not have sufficient information to support the use of chemicals to control the disease. A simulation model was developed, that calculates the onset of infection and disease development, to have a tool to implement control measures in a more timely and better informed manner. The study was conducted in the INIFAP-CEBAJ in Celaya, Guanajuato, during cycles autumn-winter 2010, 2011, 2012 and 2013, the severities of Apizaco, Alina, Armida and Esperanza genotypes were evaluated. Infection model calculates the requirements of the pathogen when ($T^{\circ} \leq 11^{\circ}\text{C}$, $\text{HR} \geq 80\%$) are achieved with daily weather data, in addition to estimating the severity in terms of percentage of infected tissue. When comparing estimates of the model with field data high relationship was found, indicating that the model can be used reliably. The risk study conducted showed that the conditions for rust infection occur at least ten days in February with a probability of 80%, a very high risk considering that most of the sowings in El Bajío are in December.

Key words: stripe rust, simulation model, *Hordeum vulgare*, *Puccinia striiformis*.

Dedicada a:

Toda mi familia, en especial a mis padres y hermanos

A mis amigos

A la memoria de Lulú Zambrano y el Dr. Everardo Villarreal

Agradecimientos

A mi consejo particular:

Dr. Juan Ángel Quijano Carranza

Dr. José Sergio Sandoval Islas

Dr. Mauro Zamora Díaz

Dr. René Gómez Mercado

Al Colegio de Postgraduados por el apoyo brindado para realizar mis estudios.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), a través del Centro de Investigación Regional Centro y el Campo Experimental Bajío (CEBAJ), por las facilidades para desarrollar este trabajo de investigación.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por el apoyo, mediante beca para mis estudios de maestría.

CONTENIDO	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema.....	2
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivo.....	2
1.4. Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. La cebada.....	3
2.1.1. Clasificación taxonómica.....	3
2.1.2. Características botánicas.....	3
2.1.3. Clima.....	4
2.1.4. Uso.....	4
2.1.5. Importancia de la cebada a nivel mundial.....	4
2.1.6. Importancia del cultivo a nivel nacional.....	5
2.1.7. Importancia de la cebada en el estado de Guanajuato.....	6
2.2. Roya lineal de la cebada.....	6
2.2.1. Clasificación taxonómica.....	6
2.2.2. Descripción taxonómica.....	7
2.2.3. Factores que originan el desarrollo de la roya lineal en la cebada.....	7
2.2.4. Ciclo de vida.....	7
2.2.5. Síntomas y daños.....	8
2.3. Estación meteorológica.....	9
2.4. Estación meteorológica automatizada.....	10
2.5. Red meteorológica.....	10
2.6. Uso de estaciones meteorológicas en la agricultura.....	10
2.7. Aplicaciones de la información climática en la agricultura.....	10
2.8. Sistemas dinámicos y modelos en la agricultura.....	12
2.8.1. Los sistemas.....	12
2.8.2. Los patosistemas.....	13
2.8.3. Los modelos de simulación.....	13

2.8.4. Tipos de variables.....	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1. Ubicación de la investigación.....	14
3.2. Materiales y equipo.....	14
3.3. Modelo de infección y desarrollo de la roya lineal.....	15
3.3.1. Elaboración del diagrama conceptual.....	15
3.3.2. Edad fisiológica.....	16
3.3.3. Producción de materia seca.....	16
3.3.4. Roya lineal.....	17
3.3.4.1. Variables de estado.....	17
3.3.4.2. Variables de tasa.....	18
3.4. Mapa de distribución del hospedante.....	21
3.5. Mapa de riesgo agroclimático.....	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
5. CONCLUSIONES.....	33
6. BIBLIOGRAFÍA.....	33

LISTA DE CUADROS Y FIGURAS

Página

Cuadro 1. Principales países productores de cebada.....	4
Cuadro 2. Principales Estados productores de cebada.....	5
Cuadro 3. Principales municipios productores de cebada en Guanajuato en el 2012.....	6
Cuadro 4. Datos de severidad de <i>P. striiformis</i> f. sp. <i>hordei</i> reales y simulados de diferentes variedades de cebada registrados en cinco fechas de siembra durante cuatro ciclos de cultivo.....	21
Figura 1. Ciclo de vida de la roya lineal (<i>P. striiformis</i>), representado en el ciclo primavera-verano.....	8
Figura 2. Planta de cebada infectada con <i>P. striiformis</i>	9
Figura 3. Diagrama relacional del crecimiento exponencial (Forrester 1961).....	14
Figura 4. Diagrama conceptual del patosistema cebada-roya lineal.....	16
Figura 5. Estructura del modelo dinámico de infección y desarrollo de la roya lineal de la cebada, construido en Vensim®.....	20
Figura 6. Gráfico de severidad simulada en el ciclo 2009-2010, para las cinco fechas de siembra.....	22
Figura 7. Gráfico de severidad simulada en el ciclo 2010-2011, para las cinco fechas de siembra.....	23
Figura 8. Gráfico de severidad simulada en el ciclo 2011-2012, para las cinco fechas de siembra.....	24
Figura 9. Gráfico de severidad simulada en el ciclo 2012-2013, para las cinco fechas de siembra.....	24
Figura 10. Daño de roya lineal en el genotipo susceptible.....	25
Figura 11. Gráfico de regresión lineal entre la severidad simulada y observada de roya lineal en cinco fechas de siembra en el ciclo 2009-2010 en la localidad de Celaya, Gto.....	26
Figura 12. Delimitación de zonas de riesgo a roya lineal en el Estado de Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de enero.....	27

Figura 13. Delimitación de riesgo a roya lineal en zonas de producción de cebada en Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de enero.....	28
Figura 14. Delimitación de zonas de riesgo a roya lineal en el Estado de Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de febrero.....	29
Figura 15. Delimitación de riesgo a roya lineal en zonas de producción de cebada en Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de febrero.....	30
Figura 16. Delimitación de zonas de riesgo a roya lineal en el Estado de Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de marzo.....	31
Figura 17. Delimitación de riesgo a roya lineal en zonas de producción de cebada en Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de marzo.....	32

INTRODUCCIÓN

En México, 67% de la producción total de cebada corresponde a siembras de temporal (Primavera-Verano) y 33% restante corresponde a la modalidad de riego (Otoño-Invierno). La región donde se cultiva bajo condiciones de riego es El Bajío, que corresponde a los estados de Querétaro, Guanajuato, Michoacán y Jalisco; en el periodo comprendido de 2003 a 2006, la producción promedio en El Bajío fue de 351 mil toneladas (Islas, 2008).

La roya lineal de la cebada, causada por *Puccinia striiformis* f. sp. *Hordei*, es una enfermedad grave en el bajío, ya que el cultivo se establece en el ciclo de riego otoño-invierno, y el hongo se ve favorecido durante ese periodo debido a que es un patógeno de baja temperatura y constituye un problema importante en lugares donde prevalece el clima fresco y húmedo (Stubbs, 1988). El rango de temperatura óptimo para la germinación de las esporas es de 9-13°C, y de 12-15°C para su desarrollo y esporulación (Roelfs *et al.*, 1992). Las royas se pueden controlar con aspersiones de fungicidas, sin embargo, se incrementan los costos de cultivo y los daños al ambiente (Sandoval *et al.*, 1999). La infección por roya reduce el vigor de la planta y el crecimiento de la raíz, incrementa la pérdida de agua y disminuye la cantidad de fotosintatos disponibles para el llenado de grano, resultando en reducciones en el rendimiento (Davis y Jackson, 2002). La intensidad de la enfermedad cambia de un ciclo a otro, en respuesta a las condiciones meteorológicas que se presenten. En la actualidad, los esquemas de manejo integrado utilizan información del hospedante, del patógeno y de las condiciones meteorológicas, pero ninguno permite alertar o pronosticar el inicio de la infección o el desarrollo del patógeno. Los modelos dinámicos permiten la integración de las variables asociadas al patosistema, además de cuantificar los cambios atribuibles a las condiciones meteorológicas, para de esta manera, contar con información suficiente que sustente la aplicación de productos para controlar la enfermedad. Para esto, se realizó un modelo que estima el inicio de la infección y el desarrollo de la roya lineal de la cebada (*P. striiformis* f. sp. *Hordei*) en el Estado de Guanajuato, con la finalidad de utilizarlo como herramienta para la toma de decisiones en la prevención y manejo de esta enfermedad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La roya lineal de la cebada, causada por *Puccinia striiformis* f. sp. *Hordei*, es una enfermedad grave en el bajío, ya que el cultivo se establece en el ciclo otoño-invierno, y el hongo se ve favorecido durante ese periodo, sin embargo, la severidad es diferente cada ciclo, dependiendo de las condiciones meteorológicas que se presenten.

Esta enfermedad ocasiona la reducción general del vigor de la planta, en consecuencia causa una disminución del número de espigas y de granos por espiga. Los granos pueden resultar seriamente arrugados y de bajo peso. Los ataques severos pueden causar disminuciones en el rendimiento de hasta el 100%.

JUSTIFICACIÓN

Los cambios en la intensidad de la enfermedad están directamente asociados con la presencia del hospedante susceptible, el inóculo disponible en el ambiente y las condiciones meteorológicas favorables para el patógeno. El modelo de infección y desarrollo de la roya lineal, representa mediante ecuaciones matemáticas, los cambios en los procesos biológicos tanto del hospedante como del patógeno, en función de las condiciones meteorológicas que se presenten a diario, para poder implementar medidas de control de una manera más oportuna y mejor informada.

En la actualidad existen pocos estudios y herramientas metodológicas dirigidas hacia la predicción y alerta sobre los principales problemas fitosanitarios en el Estado desde un punto de vista económico ecológico y social, esta necesidad ha sido la principal razón por la cual se decidió realizar este trabajo.

Para esto, es necesario realizar un modelo de pronóstico que permita calcular el inicio de la infección y el desarrollo de la roya lineal de la cebada (*Puccinia striiformis* f. sp. *Hordei*) en el Estado de Guanajuato, con la finalidad de instrumentar acciones para disminuir el impacto económico debido a la pérdida de cosechas del cultivo en el Estado.

OBJETIVO

Realizar un modelo de inicio de infección y desarrollo de la roya lineal de la cebada (*Puccinia striiformis* f. sp. *Hordei*) en el Estado de Guanajuato, que sea una herramienta para la toma de decisiones en la prevención y manejo de esta enfermedad.

HIPÓTESIS

Las condiciones meteorológicas, el hospedante y las fechas de siembra, son factores determinantes para la infección inicial y el desarrollo de la roya lineal de la cebada (*Puccinia striiformis* f. sp. *Hordei*).

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La Cebada

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

- Reino: Plantae
- División: Magnoliophyta
- Clase: Liliopsida
- Orden: Poales
- Familia: Poaceae
- Subfamilia: Pooideae
- Tribu: Triticeae
- Género: Hordeum
- Especie: H. vulgare

CARACTERÍSTICAS BOTÁNICAS. La Cebada pertenece a la familia de las gramíneas. Cada espiga consta de un eje principal o raquis sobre las que se distribuyen lateralmente las espiguillas que nacen directamente del raquis, dispuestas de forma que se recubran unas a otras; las glumas son alargadas y agudas en su vértice y las glumillas están adheridas al grano; es una planta de hojas estrechas y color verde claro, en el punto en que el limbo se separa del tallo, al terminar la zona envainadora de la hoja, se desarrollan dos estípulas que se entrecruzan por delante del tallo y una corta lígula dentada aplicada contra éste; según el número de espiguillas que permanece en la espiga después de madurar se clasifican los distintos tipos de cebada, la planta suele tener un color verde

más claro que el del Trigo y en los primeros estados de su desarrollo, la planta de Trigo suele ser mas erguida; las flores tienen tres estambres y un pistilo de dos estigmas, es una planta autógama (SIAP).

CLIMA. Es un cultivo ampliamente adaptable. Se siembra en templadas en ciclos de primavera-verano, y en áreas tropicales en otoño-invierno. El tiempo de germinación es de 1 a 3 días. La cebada se ve favorecida en su crecimiento bajo condiciones de temperatura frescas. Es más tolerante a salinidad del suelo que el trigo, pero no es tan tolerante al frío como el trigo o el triticale. Tiene un ciclo corto y es relativamente tolerante a la sequía (SIAP).

USO. La cebada se utiliza tanto para alimentación de ganado como para elaboración de malta para la producción de cerveza (SIAP).

Importancia de la Cebada a Nivel Mundial

La cebada es un cultivo que ocupa el cuarto lugar en cuanto a cereales con más superficie sembrada y mayor producción a nivel mundial (136 millones de toneladas) (Cuadro 1) (FAO, 2007).

Cuadro 1. Principales países productores de cebada

Principales países productores – 2007 (millones de toneladas)	
Unión Europea	57.7*
Rusia	15.7
Canadá	11.8
España	11.7
Alemania	11
Francia	9.5
Turquía	7.4
Ucrania	6
Australia	5.9
Reino Unido	5.1
Estados Unidos	4.6

Fuente: (FAO)

Unión Europea incluye: España,
Alemania, Francia y Reino Unido

Importancia del Cultivo a Nivel Nacional

En México, 67% de la producción total de cebada corresponde a siembras de temporal (primavera-verano) y 33% restante corresponde a la modalidad de riego (otoño-invierno). Las principales zonas donde se cultiva la cebada maltera de temporal son los Valles Altos del estado de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y estado de México. Además se siembra en otras regiones como son: norte de Guanajuato, sur de San Luis Potosí, noreste de Jalisco y Durango y norte de Zacatecas. La región donde se cultiva bajo condiciones de riego es El Bajío, que corresponde a los estados de Querétaro, Guanajuato, Michoacán y Jalisco (Cuadro 2); en el período comprendido de 2003 a 2006, la producción promedio en El Bajío fue de 351 mil toneladas (Islas, 2008).

Cuadro 2. Principales Estados productores de cebada (SIAP, 2012)

ESTADO	SUP. SEMBRADA (Ha)	SUP. COSECHADA (Ha)	PRODUCCIÓN (Ton)
GUANAJUATO	45,587.50	40,603.50	217,726.45
HIDALGO	125,052.23	75,796.50	98,266.70
TLAXCALA	41,287.50	41,287.50	74,973.96
PUEBLA	41,305.00	28,809.10	51,460.68
ZACATECAS	15,606.00	12,737.00	23,002.50
MÉXICO	32,653.20	22,862.20	15,619.30
MICHOACÁN	2,647.50	2,607.50	12,561.30
DURANGO	5,445.00	5,435.00	9,600.90
QUERÉTARO	1,685.00	1,685.00	8,726.00
JALISCO	4,108.00	1,604.10	2,882.00

Importancia de la Cebada en el Estado de Guanajuato

De acuerdo al SIAP (2009), el Estado de Guanajuato ocupó el segundo lugar en superficie sembrada y el primero en producción de cebada a nivel nacional con 217,726.45 toneladas (Cuadro 2).

Las siembras de riego en el ciclo Otoño-Invierno constituyen la mayor producción en el Estado, principalmente en los municipios del Bajío, siendo Valle de Santiago el municipio con mayor producción y superficie sembrada con más de 7 mil hectáreas sembradas, alcanzando rendimientos de más de 5 toneladas por hectárea (Cuadro 3) (SIAP, 2012).

Cuadro 3. Principales Municipios productores de cebada en Guanajuato en el 2012 (SIAP)

MUNICIPIO	SUP. SEMBRADA (Ha)	SUP. COSECHADA (Ha)	PRODUCCIÓN (Ton)
VALLE DE SANTIAGO	7,341.00	7,341.00	42,577.80
SALAMANCA	6,400.00	6,400.00	37,440.00
CORTAZAR	4,000.00	4,000.00	23,200.00
IRAPUATO	3,500.00	3,500.00	20,125.00
ABASOLO	2,820.00	2,820.00	16,074.00
PÉNJAMO	2,000.00	2,000.00	10,800.00
VILLAGRÁN	1,500.00	1,500.00	10,500.00
SALVATIERRA	1,400.00	1,400.00	8,400.00

Roya Lineal de la Cebada (*Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*)

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

- Reino: Fungi
- División: Basidiomycota
- Clase: Pucciniomycetes
- Orden: Pucciniales
- Familia: Pucciniaceae

- Género: *Puccinia*
- Especie: *P. striiformis*

DESCRIPCIÓN TAXONÓMICA

La roya lineal de la cebada es una enfermedad causada por el hongo *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*. *Puccinia striiformis* es una roya con fases urediniales y teliales producidas durante su ciclo de vida. Las urediosporas completan múltiples ciclos asexuales a lo largo de la temporada y estos ciclos causan el principal daño al cultivo (Line, 2002). Sólo una hoja infectada por 30 hectáreas de cultivo se necesita para sobrevivir al verano y producir infecciones severas. Las esporas de la roya se dispersan por el viento a grandes distancias para iniciar las infecciones. Este hongo es un parásito obligado, y sus principales hospederos son el trigo y la cebada (Hollaway, 2005).

FACTORES QUE ORIGINAN EL DESARROLLO DE LA ROYA LINEAL EN LA CEBADA

Los factores necesarios para que ocurra una infección son los siguientes:

- Presencia del inóculo. Esto es la presencia de uredosporas en el ambiente.
- Cultivo establecido. Se requiere la presencia del cultivo en su etapa susceptible.
- Condiciones de clima óptimas. La germinación de uredosporas se ve favorecida cuando el rango de temperatura se encuentra entre 9-11°C y la humedad relativa es igual o mayor al 80% (Hollaway, 2005).

CICLO DE VIDA

La roya lineal sobrevive al verano sobre pastos que sirven como hospederos alternantes. El viento dispersa las uredosporas hacia cultivos de cebada. Las uredosporas germinan en la superficie de la hoja y penetran directamente a la planta, formando una estructura similar a la raíz que se utiliza para recolectar nutrientes (Figura 1). Esta estructura produce más uredosporas y pueden dispersarse a grandes distancias por el viento y a través del contacto físico (Park, 2000).

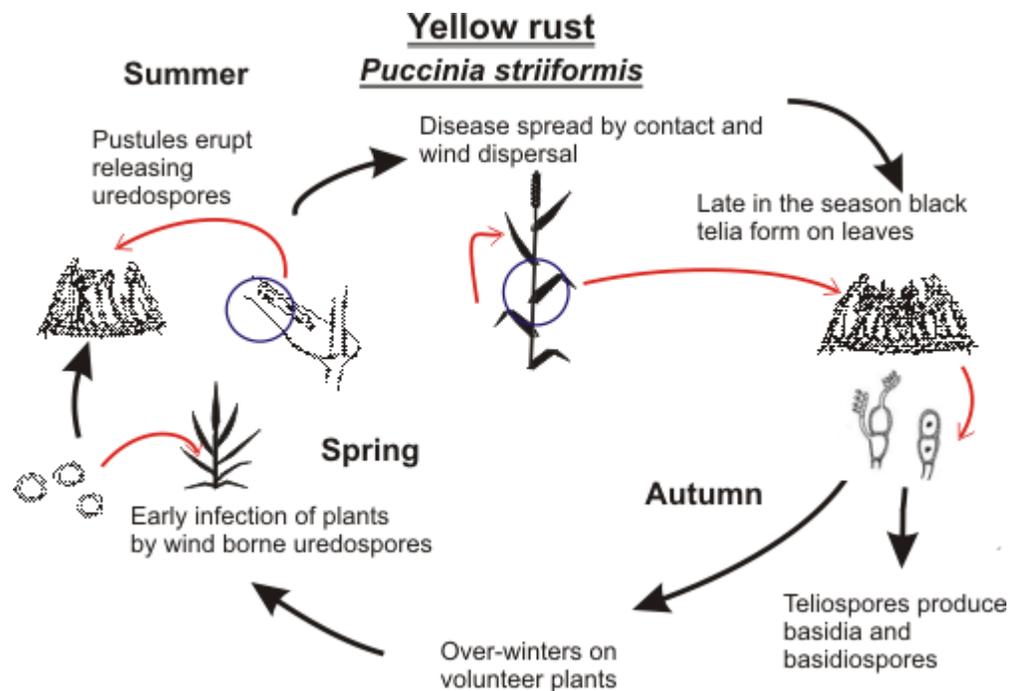


Figura 1. Ciclo de vida de la roya lineal (*P. striiformis*), representado en el ciclo primavera-verano.

SÍNTOMAS Y DAÑOS

La roya lineal de la cebada se distingue por la aparición de pústulas amarillas generalmente formando líneas a lo largo de la superficie de las hojas (Figura 2). Conforme la planta madura y las temperaturas aumentan, las pústulas se oscurecen y se vuelven brillosas ya que las teliosporas están formadas. La infección por roya reduce el vigor de la planta y el crecimiento de la raíz, incrementa la pérdida de agua y disminuye la cantidad de fotosintatos disponibles para el llenado de grano, resultando en reducciones en el rendimiento (Davis y Jackson, 2002).



Figura 2. Planta de cebada infectada con *P. striiformis*.

Estación Meteorológica

Es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos

Los instrumentos comunes y variables que se miden en una estación meteorológica incluyen:

- Termómetro. Medida de temperaturas en diversas horas del día
- Termógrafo. Mide la fluctuación de la temperatura
- Barómetro. Mide la presión atmosférica en superficie
- Pluviómetro. Mide la cantidad de precipitación
- Higrómetro. Mide la humedad relativa del aire y la temperatura del punto de rocío
- Anemómetro y veleta. Mide la velocidad e indica la dirección del viento respectivamente (Medina, 2008).

Estación Meteorológica Automatizada

Una estación meteorológica automatizada es una estructura equipada con sensores que responden a estímulos electrónicos, que tienen la capacidad de registrar y coleccionar información meteorológica en forma automática y en tiempo real, que permiten monitorear la variación de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar, humedad foliar, dirección y velocidad del viento, lluvia, humedad relativa, temperatura del suelo, presión atmosférica, entre otras (Medina 2008).

Red Meteorológica

Una red meteorológica es un conjunto de estaciones meteorológicas automatizadas distribuidas bajo ciertos criterios en una región o zona, las cuales registran en forma continua las condiciones del tiempo atmosférico representativas de una región y envían los datos a una base central para ser almacenados, procesados, interpretados y distribuidos de manera oportuna a los usuarios, incluso en tiempo real o cercano al real (Medina 2008).

Uso de Estaciones Meteorológicas en la Agricultura

La información climatológica es parte fundamental para la toma de decisiones en la agricultura actualmente, con las nuevas herramientas que incluyen estaciones climatológicas automatizadas, así como los sistemas de pronósticos precisos, archivos climatológicos, y modelos de simulación dinámica de cultivos.

La agricultura es una actividad estrechamente relacionada con el clima. La cantidad de agua de lluvia, la humedad almacenada en el suelo, la ocurrencia de heladas, o la presencia de granizo, constituyen algunos de los componentes del clima que año con año repercuten en la producción de cosechas (Medina 2008).

Aplicaciones de la Información Climática en la Agricultura

La información climática es fundamental para la toma de decisiones en la agricultura.

- Temperatura del aire. Esta variable climática es importante para calcular unidades térmicas de crecimiento de cultivos, comúnmente llamadas unidades calor o grados-día, mediante las cuales es posible medir la influencia de la temperatura

en la velocidad de desarrollo de los cultivos e insectos, y con ello predecir la aparición de etapas fenológicas de cultivos y estadios biológicos en los insectos. Los registros de temperatura también se usan para calcular horas o unidades frío requeridas por los frutales caducifolios y algunos insectos durante la etapa de hibernación. En regiones de clima templado, la temperatura de 0 °C se usa como referencia para estimar períodos libres de heladas durante las etapas de crecimiento.

- Humedad relativa. Esta variable es importante para pronosticar heladas junto con la temperatura. También es una variable climática clave para el pronóstico de enfermedades de cultivos, y se utiliza en combinación con otras variables para estimar la evapotranspiración.
- Radiación solar. Es importante para estimar la acumulación de materia seca por un cultivo. También se usa para estimar la evapotranspiración potencial a través de fórmulas empíricas que involucran diversos factores de clima.
- Velocidad y dirección del viento. Estos dos factores son componentes esenciales para determinar la evapotranspiración en cultivos. También son importantes por su efecto en la erosión del suelo y daños a los cultivos, así como en la programación de aplicaciones de pesticidas. Por otro lado permiten conocer la trayectoria de organismos benéficos y nocivos a las plantas y distribución del polen de las plantas
- Precipitación pluvial. Se utiliza para estudiar el efecto en la producción de cultivos, predecir posibles problemas de enfermedades y daños físicos en los cultivos. También puede utilizarse para calcular balances hídricos e índices de sequía y fechas de siembra, entre otras.
- Humedad de las hojas. El contenido de humedad de las hojas está directamente relacionado con la presencia de enfermedades, por lo que esta variable se utiliza para su pronóstico.
- Con toda la información que captan las estaciones, es posible además calcular otros parámetros que son muy importantes para la agricultura, tal es el caso de:
- La probabilidad de ocurrencia de lluvias, que es de gran utilidad para el cálculo de balances de humedad en cultivos, labores de preparación de suelos, siembra,

germinación, control de malezas, deshierpe, riegos suplementarios, aplicación de fertilizantes, cosechas, etc.

- Ocurrencia de temperaturas extremas en duración y localización, que ayudan a medir niveles de riesgo en heladas tempranas o tardías, o agobio calórico en las plantas.
- Estimación de tasas fotosintéticas y de evapotranspiración mediante la información de radiación solar y horas de luminosidad.
- Determinación del nivel de riesgo climático para la ocurrencia de enfermedades en el cultivo, utilizando de manera combinada los datos de humedad relativa, humedad de la hoja, nubosidad (radiación solar) y temperatura.
- Índices de acame de plantas y daño a frutos y flores, mediante la valoración de los niveles de velocidad de viento registrados. Esta información de velocidad de viento puede ser útil también en el diseño y construcción de cortinas rompevientos.
- En general la información del clima es parte fundamental para la toma de decisiones en la agricultura (Medina 2008).

Sistemas Dinámicos y Modelos en la Agricultura

LOS SISTEMAS

Los sistemas y modelos de simulación han sido utilizados por ingenieros durante muchos años y su éxito con este enfoque ha inspirado a biólogos y agrónomos para aplicar técnicas similares e sus disciplinas. Un sistema es una parte de la realidad que contiene elementos interrelacionados, en el que se deben establecer límites. La dinámica de sistemas es una disciplina que se aplica al estudio del comportamiento de los sistemas a través del tiempo. Los sistemas pueden ser clasificados con base a distintos aspectos, entre ellos el número de relaciones que existen entre los elementos, así como su estructura y complejidad (Rabbinge, 1989).

LOS PATOSISTEMAS

Un patosistema es un subsistema de un ecosistema, el cual está definido por el fenómeno del parasitismo. Un patosistema vegetal es aquel en el que la especie hospedante es una planta. De acuerdo con esto, existen dos tipos de patosistemas vegetales, el patosistema vegetal silvestre, el cual se encuentra en un estado de equilibrio y de balance natural debido a que el hombre no ha estado involucrado. Los componentes de este son, la población del hospedante, la población del parásito y el medio ambiente. El patosistema de cultivos se deriva de un patosistema silvestre con una diferencia fundamental, la presencia del hombre como cuarto componente. Por lo tanto, el patosistema de cultivos tiende a ser muy inestable y las pérdidas ocasionadas por parásitos de cultivos pueden llegar a ser muy altas (Robinson, 1987).

LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

Un modelo es una representación simplificada de un sistema. La simulación se define como el arte de construir modelos matemáticos y el estudio de sus propiedades en referencia a los sistemas que representan. Existen dos tipos de modelos: estáticos y dinámicos. Los modelos estáticos representan relaciones entre variables las cuales no involucran el tiempo, mientras que los modelos dinámicos describen la manera en la que un sistema cambia a través del tiempo. Por esto es necesario hacer una distinción entre modelos “descriptivos” y “explicativos”. Se puede diseñar un modelo de un sistema, siempre y cuando el conocimiento que se tenga del sistema sea suficientemente detallado y completo (Rabbinge, 1989).

TIPOS DE VARIABLES

Los modelos dinámicos de tipo explicativo, se basan en el supuesto de que el estado de cada sistema se puede cuantificar en cualquier momento, y que esos cambios en el estado se pueden describir mediante ecuaciones matemáticas. Las variables de estado se expresan generalmente en cantidades, tales como biomasa, número de individuos de una especie, contenido de agua en el suelo, cantidad de enfermedad en una planta, etc. Las variables de refuerzo caracterizan el efecto del ambiente sobre el sistema y sus límites, y deben ser monitoreadas continuamente. La precipitación, temperatura,

radiación y humedad relativa son ejemplos de este tipo de variables. Las tasas o variables de flujo están asociadas a cada variable de estado y representan el flujo de material de una variable de estado a otra (Rabbinge, 1989).

Para esquematizar la estructura de éstos modelos es común utilizar diagramas causales, en los cuales las variables se interconectan mediante flechas, con las cuales se identifican las principales retroalimentaciones. Y diagramas de flujo, que involucran algunas de las variables antes descritas (Figura 3).

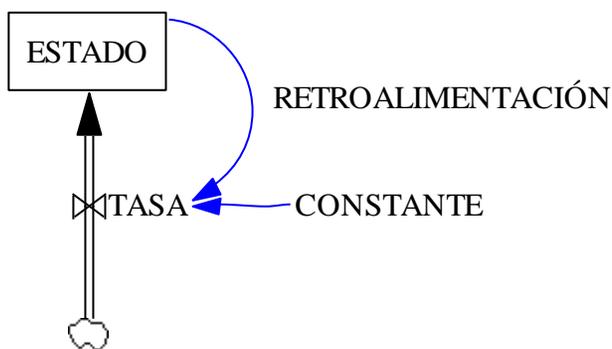


Figura 3. Diagrama relacional del crecimiento exponencial (Forrester 1961).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la Investigación

El trabajo de investigación se llevó a cabo en el INIFAP Campo Experimental Bajío, en Celaya, Guanajuato.

Materiales y Equipo

El monitoreo meteorológico se realizó a través de las estaciones de la red meteorológica de la Fundación Guanajuato Produce y estaciones portátiles marca Davis.

El monitoreo de incidencia y severidad fue realizado durante los ciclos Otoño-Invierno 2010, 2011, 2012 y 2013 en materiales de cebada susceptibles y moderadamente susceptibles a roya lineal.

El software y equipo utilizado fue:

- Computadora con SO Windows 7
- Software
 - Vensim® 5.6d Ventana Simulation Enviroment
 - SIMPEC
 - ESRI® ArcMap™ 10.0

Modelo de infección y desarrollo de la roya lineal

ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA CONCEPTUAL

Se consideraron los principales factores que integran al patosistema y se identificaron sus relaciones causales. De esta manera se obtuvo el diagrama conceptual (Figura 4).

Estos factores se pueden separar en dos grupos:

Factores Físicos. Son los relacionados con el clima (temperatura, humedad relativa, precipitación, etc.).

Factores Biológicos. Son todos los relacionados con el agente causal de la enfermedad y el hospedante (esporas depositadas, esporas germinadas, lesiones infecciosas, área foliar, fenología del cultivo, etc.).

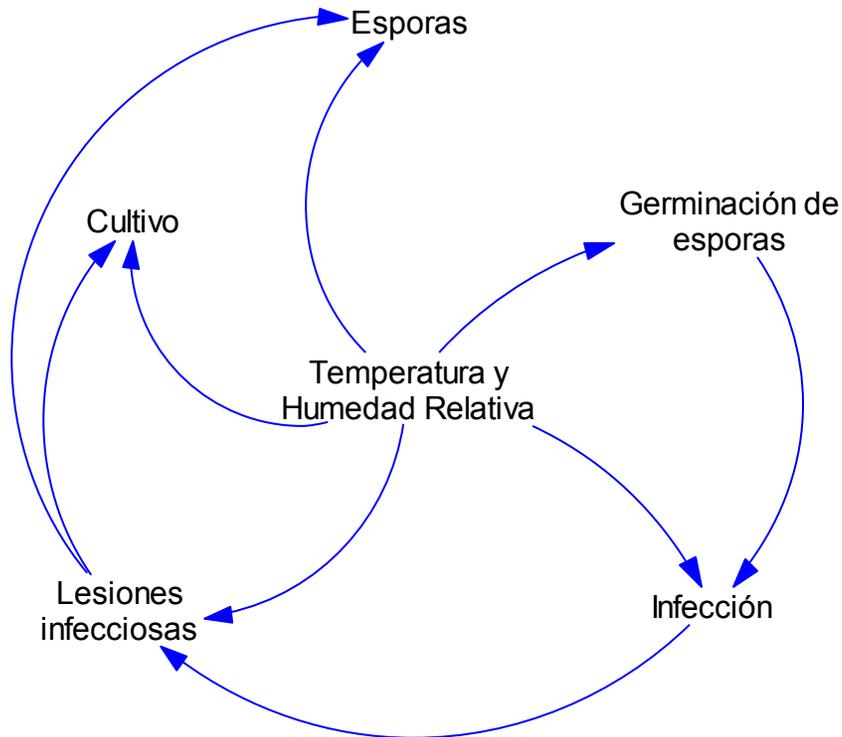


Figura 4. Diagrama conceptual del patosistema cebada-roya lineal.

El modelo está compuesto por tres módulos principales:

EDAD FISIOLÓGICA

Calcula las etapas fenológicas del cultivo en función de la acumulación de unidades calor mediante el método residual, con una temperatura base de 0°C.

PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA

Este módulo calcula los kilogramos de materia seca por día, y reparte las proporciones correspondientes a la raíz, tallo, hojas y grano, en función de la radiación fotosintéticamente activa y la eficiencia de uso de la radiación propia del cultivo, para estimar la tasa fotosintética diaria.

- **Índice de área foliar.** Se calcula en función de la etapa fenológica del cultivo, kg de hoja y área foliar específica.

Ecuación

$$\text{Índice de Area Foliar} = \text{IF THEN ELSE}(\text{EDFIS} \geq 5, ((\text{PSHj} * \text{AFE}) / 10000) * 0.25, (\text{PSHj} * \text{AFE}) / 10000)$$

El porcentaje de infección de roya lineal se calculará en función del índice de área foliar.

ROYA LINEAL

Calcula el inicio de la infección de *Puccinia striiformis*, en función de los requerimientos óptimos de temperatura y humedad relativa. Y el desarrollo del hongo a lo largo del ciclo del cultivo. El esquema del modelo se muestra en la Figura 5. El resultado de cada corrida se expresa en porcentaje de severidad en las zonas con mayor incidencia, las cuales se encuentran pegadas a bordos, canales, o cualquier toma de agua, ya que con frecuencia estas zonas son las que presentan mayor incidencia.

VARIABLES DE ESTADO

- **Esporas depositadas.** Esta variable se calcula en función de la tasa de esporas depositadas, la mortalidad de esporas depositadas y la tasa de germinación de esporas.

Ecuación

$$\text{Esporas depositadas} = \text{INTEG} (\text{Tasa esporas depositadas} - \text{Germinación esporas} - \text{mortalidad esporas depositadas})$$

- **Esporas germinadas.** Son las urediosporas que en condiciones favorables desarrollaron tubo germinativo y se calcula a partir de la tasa de germinación de esporas, mortalidad de esporas germinadas y la tasa de infecciones efectivas.

Ecuación

$$\text{Esporas germinadas} = \text{INTEG} (\text{Germinación esporas} - \text{mortalidad esporas germinadas} - \text{Tasa de infecciones efectivas})$$

- **Lesiones infecciosas.** Son las pústulas formadas, a partir de las cuales se pueden seguir desarrollando esporas potencialmente infecciosas y por lo tanto

continuar infectando el área foliar disponible. Se calcula en función de la tasa de infecciones efectivas y de la mortalidad de lesiones efectivas.

Ecuación

Lesiones infecciosas = INTEG (Tasa de infecciones efectivas-mortalidad lesiones infecciosas)

Variables de tasa

- **Tasa de deposición de esporas.** Es la cantidad de esporas por día que son interceptadas por el cultivo en función del inóculo presente en el ambiente, área foliar disponible y el inóculo secundario proveniente de las lesiones infecciosas.

Ecuación

*Tasa de deposición de esporas = IF THEN ELSE(EDFIS>0:AND:EDFIS<=4.99, (esporas iniciales*fracción esp dep)+(Lesiones infecciosas*100*0.03), 0)*(1-fracción tejido enfermo)*

- **Tasa de mortalidad de esporas depositadas.** Depende de las esporas depositadas y de la fracción total de mortalidades cuando la temperatura y humedad relativa sobrepasan los umbrales.

Ecuación

*Tasa de mortalidad de esporas depositadas = Esporas depositadas*fracción total esp dep*

- **Tasa de germinación de esporas.** Está en función de las esporas depositadas, la temperatura mínima, la humedad relativa, la frecuencia de infección y de la fracción total de mortalidades ocasionadas por temperatura y humedad relativa más allá de los umbrales.

Ecuación

Tasa de germinación de esporas = IF THEN ELSE(TMIN<=11:AND:hr>=80, (Esporas depositadas(1-fracción total esp dep))*frecuencia de infección, 0)*

- **Tasa de mortalidad de esporas germinadas.** Es la cantidad de esporas que mueren sin producir una lesión infecciosa y está determinada por una fracción de las esporas germinadas.

Ecuación

*Tasa de mortalidad de esporas germinadas = Esporas germinadas*fracción esp germ*

- **Tasa de infecciones efectivas.** Es la cantidad de infecciones diarias en función de las esporas germinadas, el periodo de latencia, y la disponibilidad de tejido para infectar.

Ecuación

IF THEN ELSE(EDFIS>=2, (Esporas germinadas/periodo de latencia)(1-fracción tejido enfermo), 0)*

- **Tasa de mortalidad de lesiones infecciosas.** Calcula la senescencia de las lesiones infecciosas en función del periodo de latencia.

Ecuación

Lesiones infecciosas/periodo de latencia

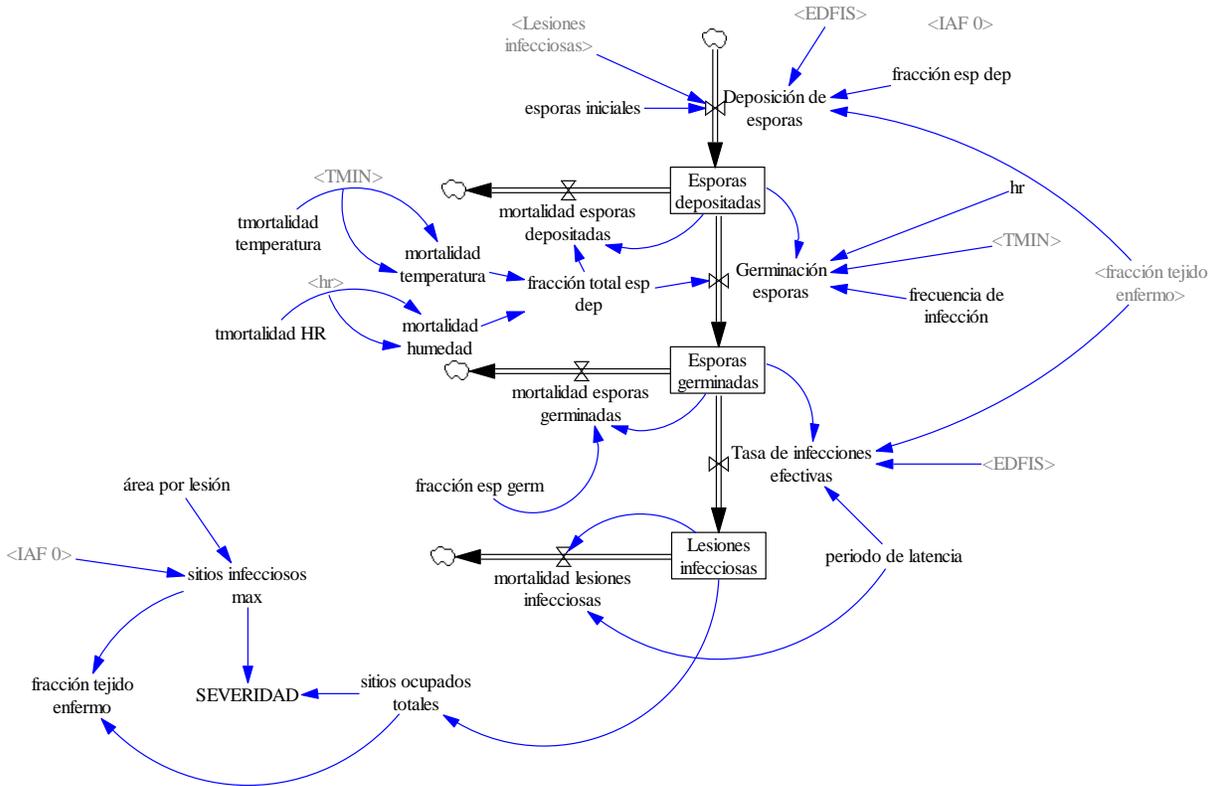


Figura 5. Estructura del modelo dinámico de infección y desarrollo de la roya lineal de la cebada, construido en Vensim®.

Para el ajuste del modelo se utilizaron datos de monitoreo de severidad de roya lineal de cebada en el Campo Experimental Bajío del INIFAP. Los datos corresponden a los ciclos de otoño – invierno 2009-2010, 2010,2011, 2011-2012, 2012-2013 y 2013-2014. Las evaluaciones se realizaron en los tres genotipos más importantes en la región del bajío (Alina, Armida y Esperanza), además del genotipo Apizaco que es el susceptible universal. Se utilizó una escala porcentual, de manera que se pudiera comparar con los datos simulados por el modelo.

Para fines prácticos el modelo supone susceptibilidad absoluta del hospedante, sin embargo, las salidas del modelo se comparan con datos del genotipo susceptible absoluto, así como con datos de genotipos moderadamente susceptibles.

Esta comparación se realizó en base al máximo valor de severidad obtenido en cada corrida del modelo.

Mapa de distribución del hospedante

La disponibilidad del hospedante se representa en un mapa utilizando las estadísticas de superficie sembrada en el ciclo otoño – invierno 2012 – 2013, reportadas en el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2013).

Mapa de estudio de riesgo agroclimático

El estudio de riesgo de la enfermedad se obtuvo mediante el análisis de clima histórico de una serie de al menos 10 años para cada estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional (SMN-CONAGUA) ubicada en el estado. Para realizar el análisis se utilizó el software SIMPEC, sistema que permite analizar bases de datos de manera personalizada. Los rangos de temperatura utilizados fueron de -2 – 14°C, con un óptimo de 0 – 8°C, utilizando la temperatura mínima para realizar el análisis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El total de las simulaciones se observa en el Cuadro 4, utilizando el valor máximo registrado por el modelo. El ciclo 2009-2010 (Figura 6) fue un caso excepcional ya que se registraron fuertes lluvias en los primeros días de febrero y esto se vió reflejado en la severidad; en 2010-2011 no se presentaron condiciones extraordinarias (Figura 7); en 2011-2012 se registraron lluvias ligeras los primeros días de enero pero esto fue suficiente para favorecer las condiciones óptimas para el patógeno (Figura 8); finalmente el ciclo 2012-2013 registró 3 días de heladas muy tardías en marzo y esto resultó en un incremento en la severidad para las fechas de siembra tardías (Figuras 9 y 10).

Cuadro 4. Datos de severidad de *P. striiformis* f. sp. *hordei* reales y simulados de diferentes variedades de cebada registrados en cinco fechas de siembra durante cuatro ciclos de cultivo.

CICLO	FECHA DE SIEMBRA	SEVERIDAD				
		SIMULADOS	APIZACO	ALINA	ARMIDA	ESPERANZA
2009-2010	01-nov	100	100	0	5	5
	15-nov	100	100	0	10	10
	01-dic	33	50	0	5	5
	15-dic	22	20	0	0	5
	01-ene	12	10	0	0	0

2010-2011	01-nov	3	5	0	0	0
	15-nov	0.05	0	0	0	0
	01-dic	0.01	0	0	0	0
	15-dic	0	0	0	0	0
	01-ene	0	0	0	0	0
2011-2012	01-nov	27	20	0	0	0
	15-nov	99	70	0	0	10
	01-dic	100	90	5	5	10
	15-dic	100	90	0	5	10
	01-ene	100	100	0	20	10
2012-2013	01-nov	12	5	0	0	0
	15-nov	23	10	0	0	0
	01-dic	100	30	0	0	5
	15-dic	100	80	0	0	5
	01-ene	100	100	0	5	10

Los parámetros descritos en la literatura indican que la temperatura óptima para infección de roya lineal es 11°C, sin embargo, los datos obtenidos en estos ciclos indicaban que la infección aumentaba cuando la temperatura descendía, por lo tanto, el modelo se ajustó de acuerdo a estas observaciones.

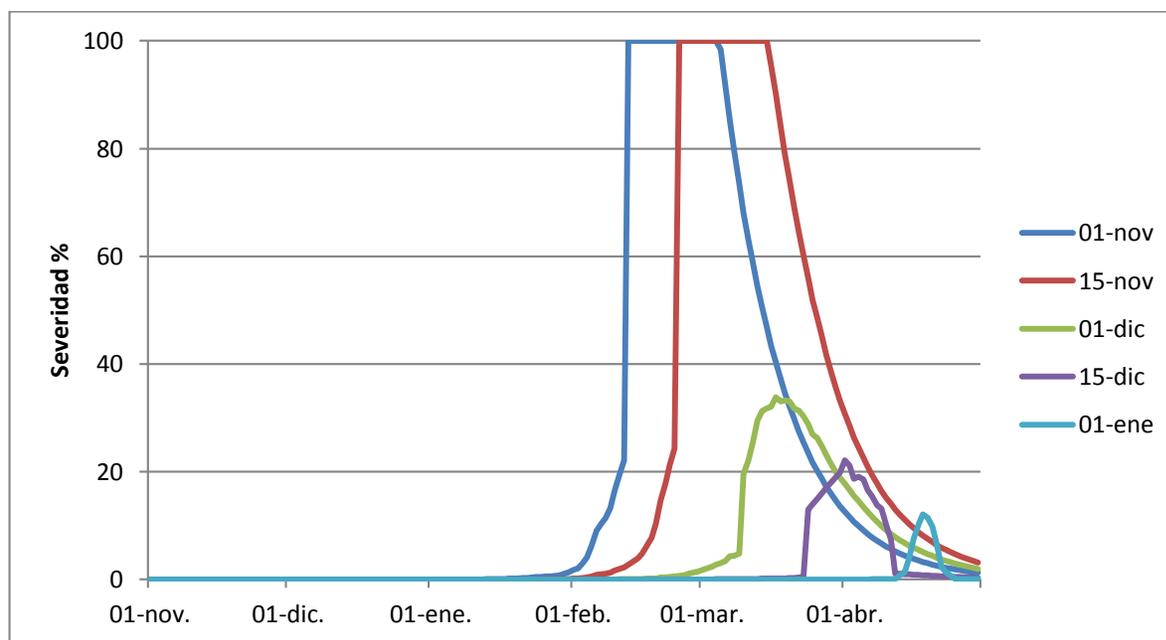


Figura 6. Gráfico de severidad simulada en el ciclo 2009-2010, para las cinco fechas de siembra. Se puede observar como las dos primeras fechas alcanzan valores del 100 por ciento de severidad.

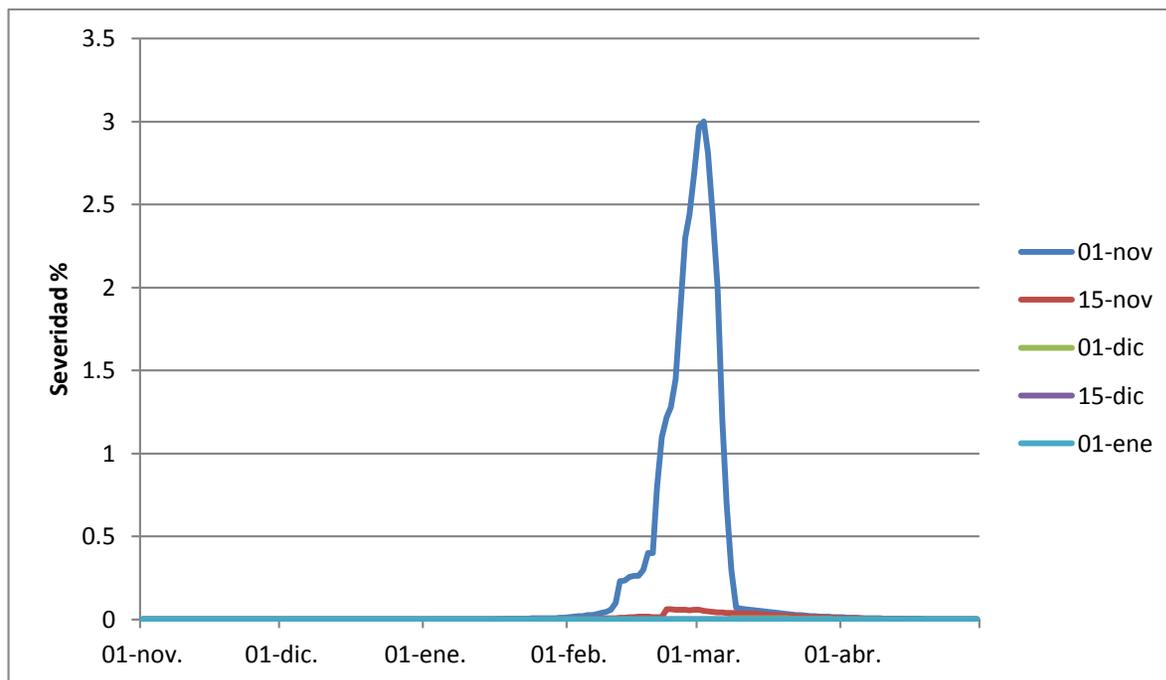


Figura 7. Gráfico de severidad simulada en el ciclo 2010-2011, para las cinco fechas de siembra. En este ciclo los valores fueron muy bajos.

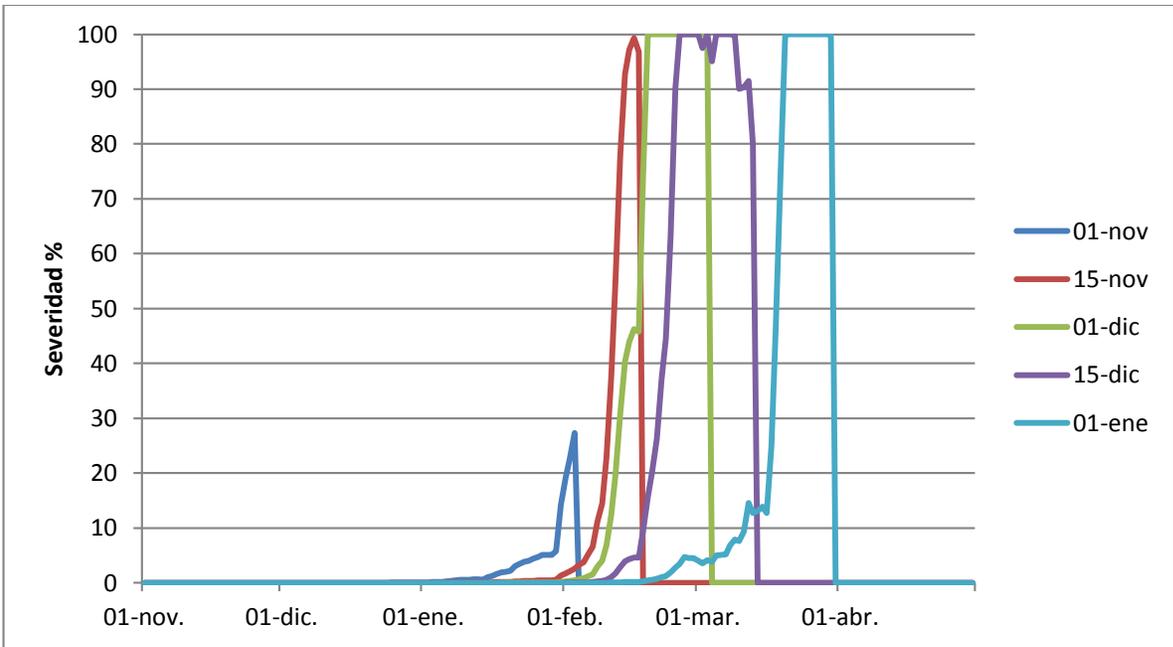


Figura 8. Gráfico de severidad simulada en el ciclo 2011-2012, para las cinco fechas de siembra. En este ciclo en particular la severidad alcanzó valores de hasta 100 en las últimas 3 fechas de siembra

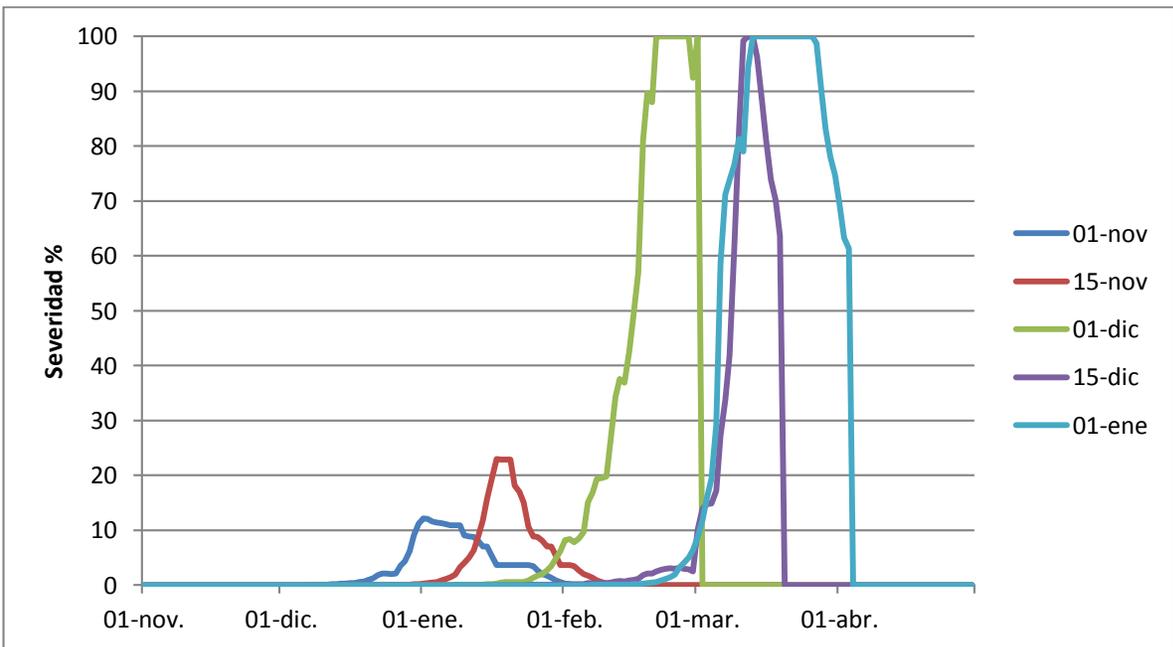


Figura 9. Gráfico de severidad simulada en el ciclo 2012-2013, para las cinco fechas de siembra. Las últimas 3 fechas de siembra llegan a 100 por ciento de severidad

Las simulaciones con el modelo para el ciclo 2009-2010, mostraron una alta relación con los datos observados en campo (Figura 11), mostrando una R^2 de 0.96, para esto se utilizó el dato más alto de severidad registrado por el modelo. Lo cual indica que el ajuste del modelo resultó en una alta precisión.



Figura 10. Daño de roya lineal en el genotipo susceptible (Apizaco), en una fecha de siembra tardía (ciclo 2012-2013), en donde se observa como las esporas pintan el suelo de color amarillo.

En la Figura 12 se muestra el mapa de riesgo a roya lineal durante el mes de enero en todo el estado, delimitado por la zona agrícola. En la Figura 13 se observa el mapa de riesgo delimitado por los municipios que conforman la zona de producción de cebada de Guanajuato, la cual cubre los municipios de Valle de Santiago, Salamanca, Cortazar, Irapuato, Jaral del Progreso y Abasolo. Como puede observarse, toda la zona cebadera presenta al menos 20 días con condiciones favorables para el patógeno, lo cual

representa una alta probabilidad de que se presente la enfermedad, sin embargo, afectaría principalmente en siembras tempranas.

El mes de febrero, es considerado el de mayor riesgo, ya que la mayor parte de las siembras se realizan en diciembre, además de las altas probabilidades de presentar condiciones favorables para el patógeno (Figuras 14 y 15). Los seis municipios presentan zonas de más de 20 días con condiciones, solo una pequeña parte de Salamanca presenta entre 15 y 20 días y en una zona de Valle de Santiago entre 10 y 15 días. Esto representa un alto riesgo ya que nos dice que en toda la zona cebadera se presentan al menos 10 días con condiciones favorables para la infección.

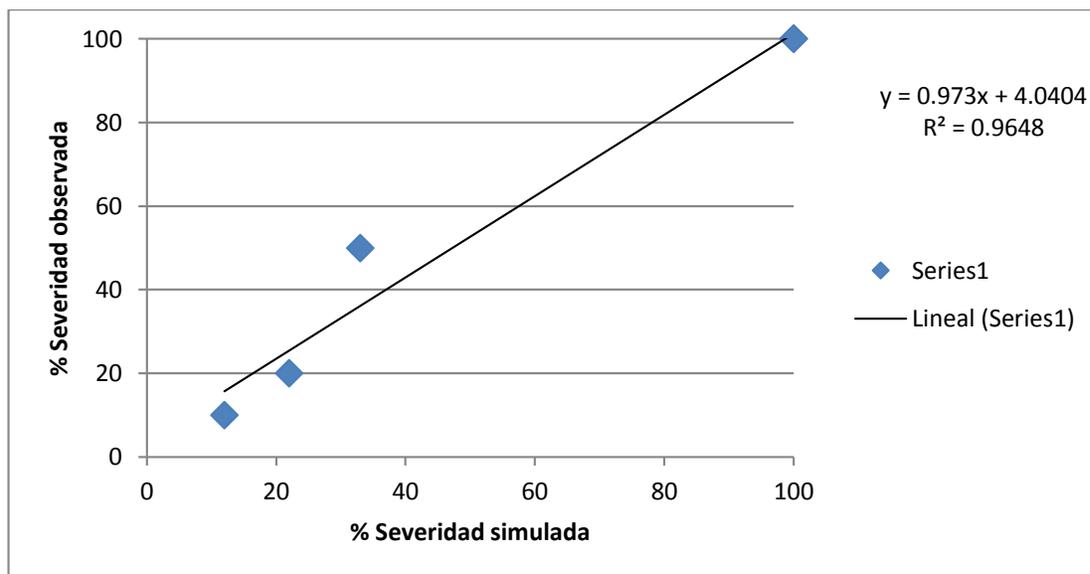


Figura 11. Gráfico de regresión lineal entre la severidad simulada y observada de roya lineal en cinco fechas de siembra en el ciclo 2009-2010 en la localidad de Celaya, Gto.

En marzo (Figuras 16 y 17), se siguen presentando condiciones favorables, sin embargo, las fechas de siembra de enero serían las principales afectadas, esto puede ocasionar pérdidas importantes como ocurrió en el ciclo 2012-2013, es por eso que se incluyó el análisis de este mes.

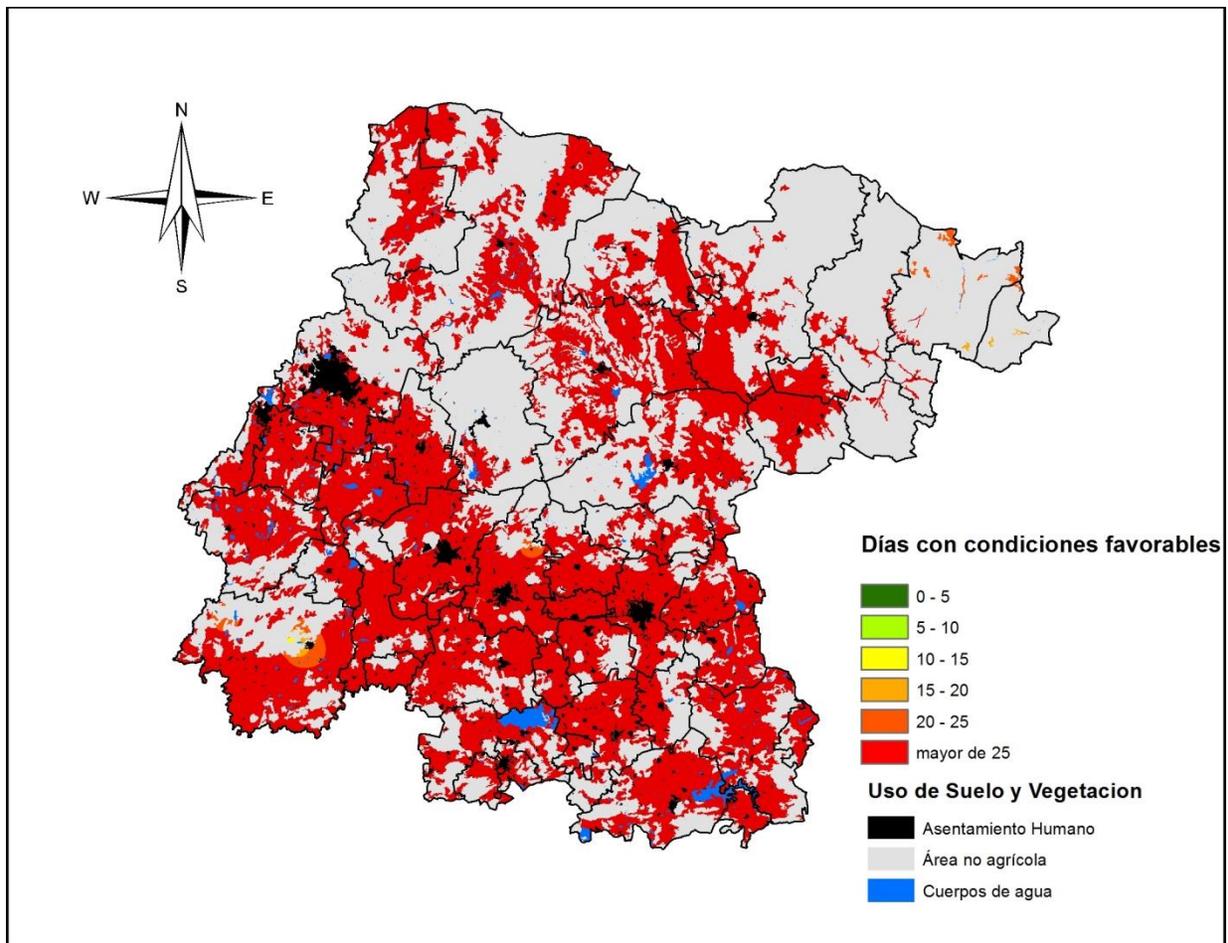


Figura 12. Delimitación de zonas de riesgo a roya lineal en el Estado de Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de enero.

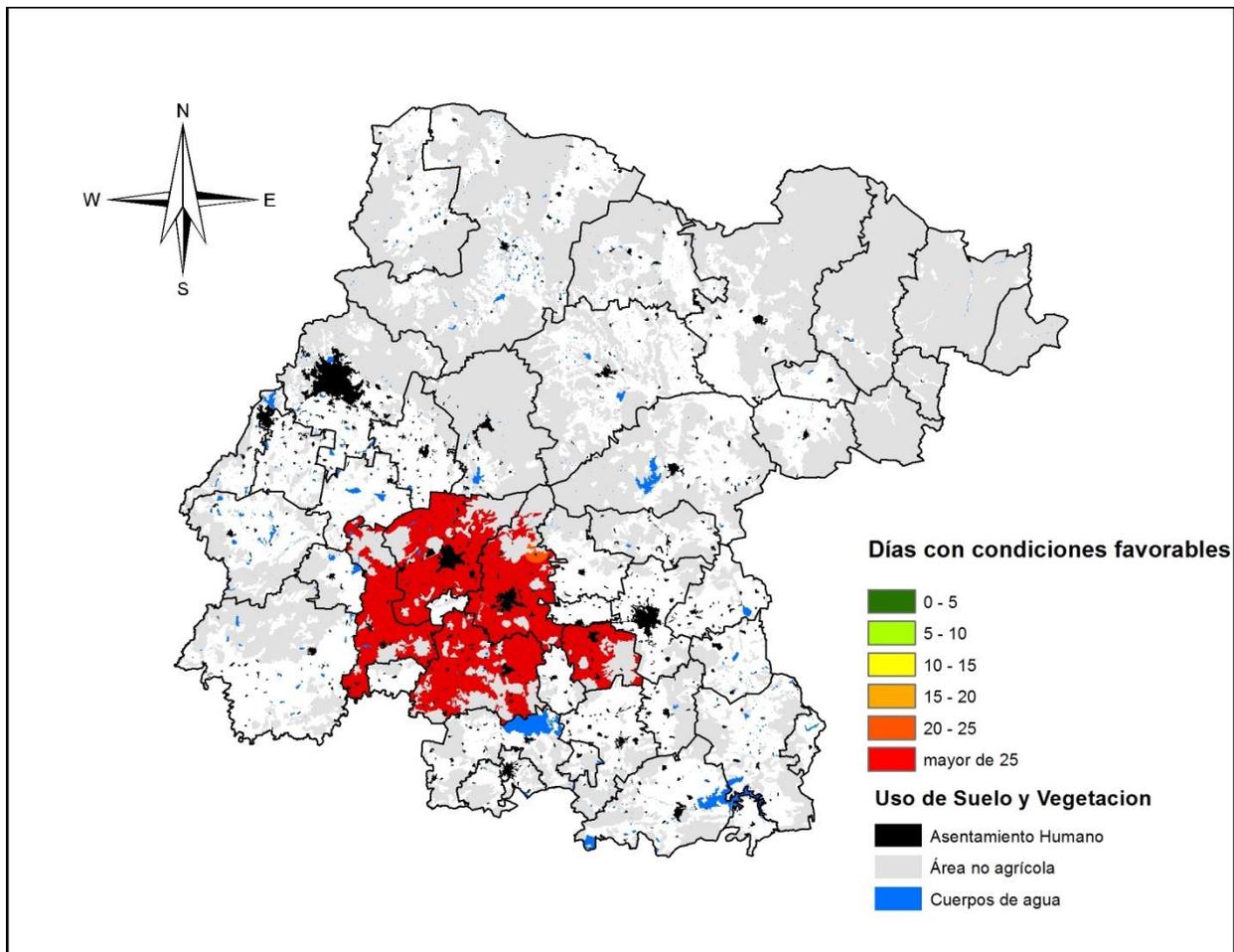


Figura 13. Delimitación de riesgo a roya lineal en zonas de producción de cebada en Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de enero. Los seis municipios presentan más de 25 días con condiciones, solo una pequeña parte de Salamanca presenta entre 20 y 25 días.

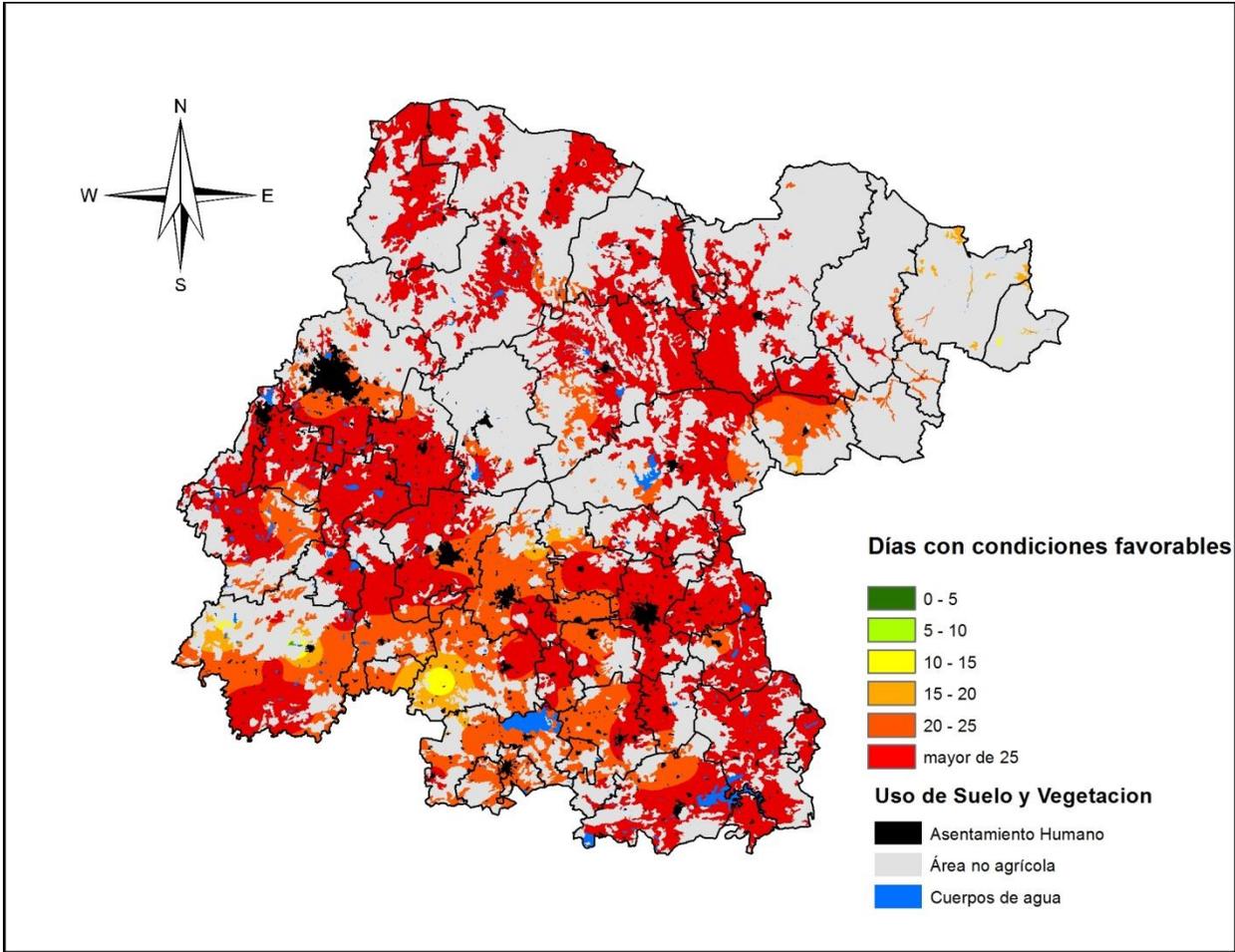


Figura 14. Delimitación de zonas de riesgo a roya lineal en el Estado de Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de febrero.

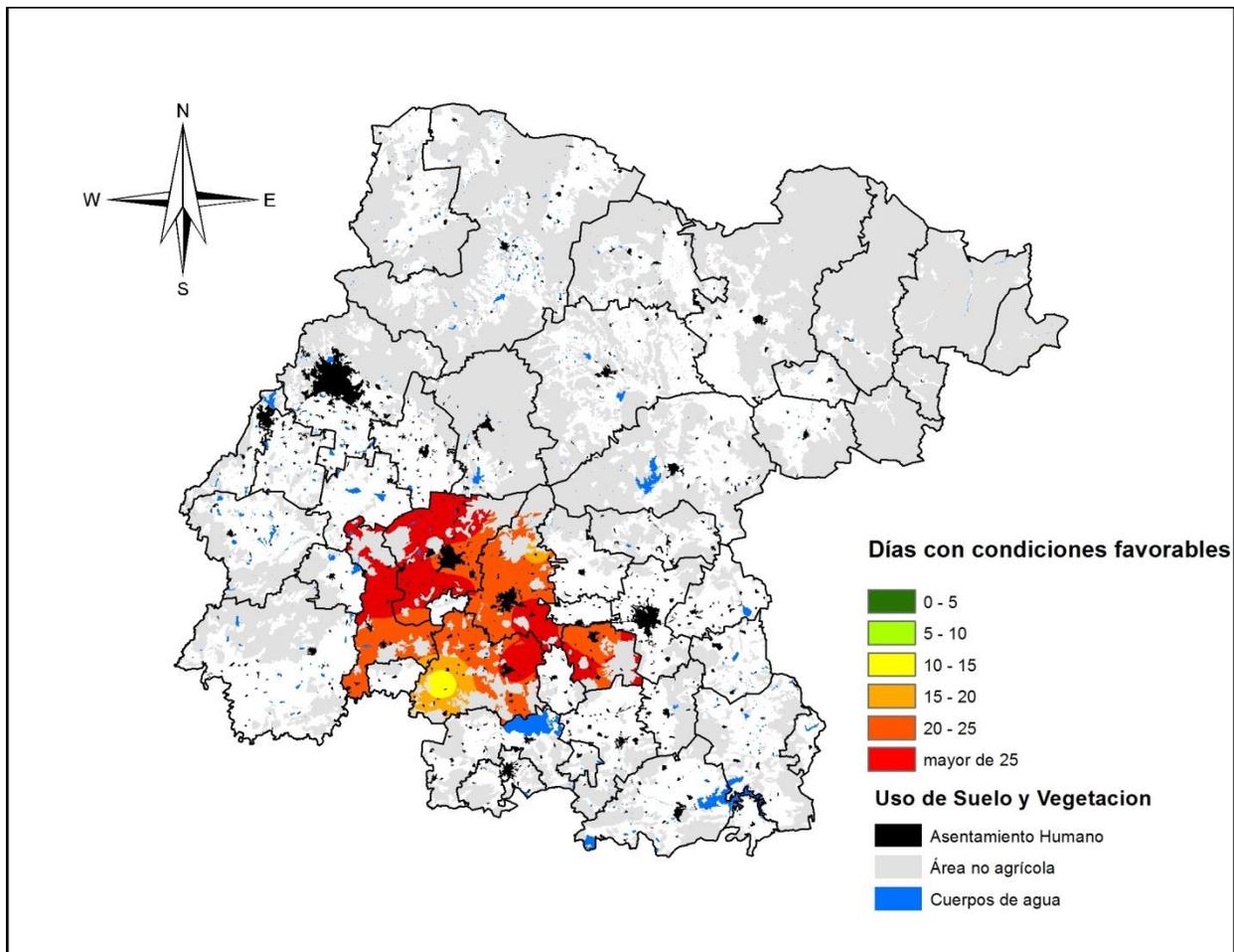


Figura 15. Delimitación de riesgo a roya lineal en zonas de producción de cebada en Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de febrero. Los seis municipios presentan zonas de más de 20 días con condiciones, solo una pequeña parte de Salamanca presenta entre 15 y 20 días y en una zona de Valle de Santiago entre 10 y 15 días.

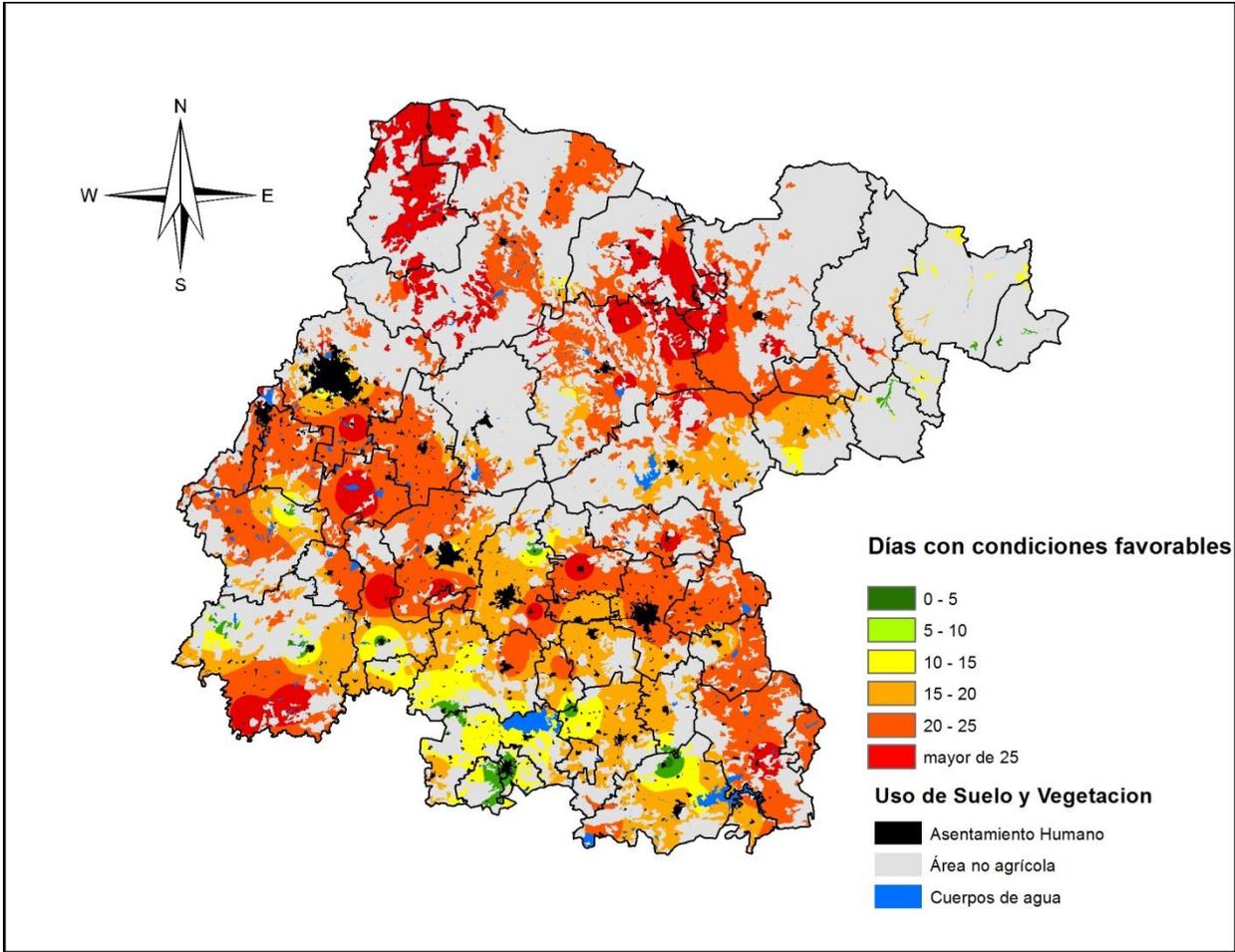


Figura 16. Delimitación de zonas de riesgo a roya lineal en el Estado de Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de marzo.

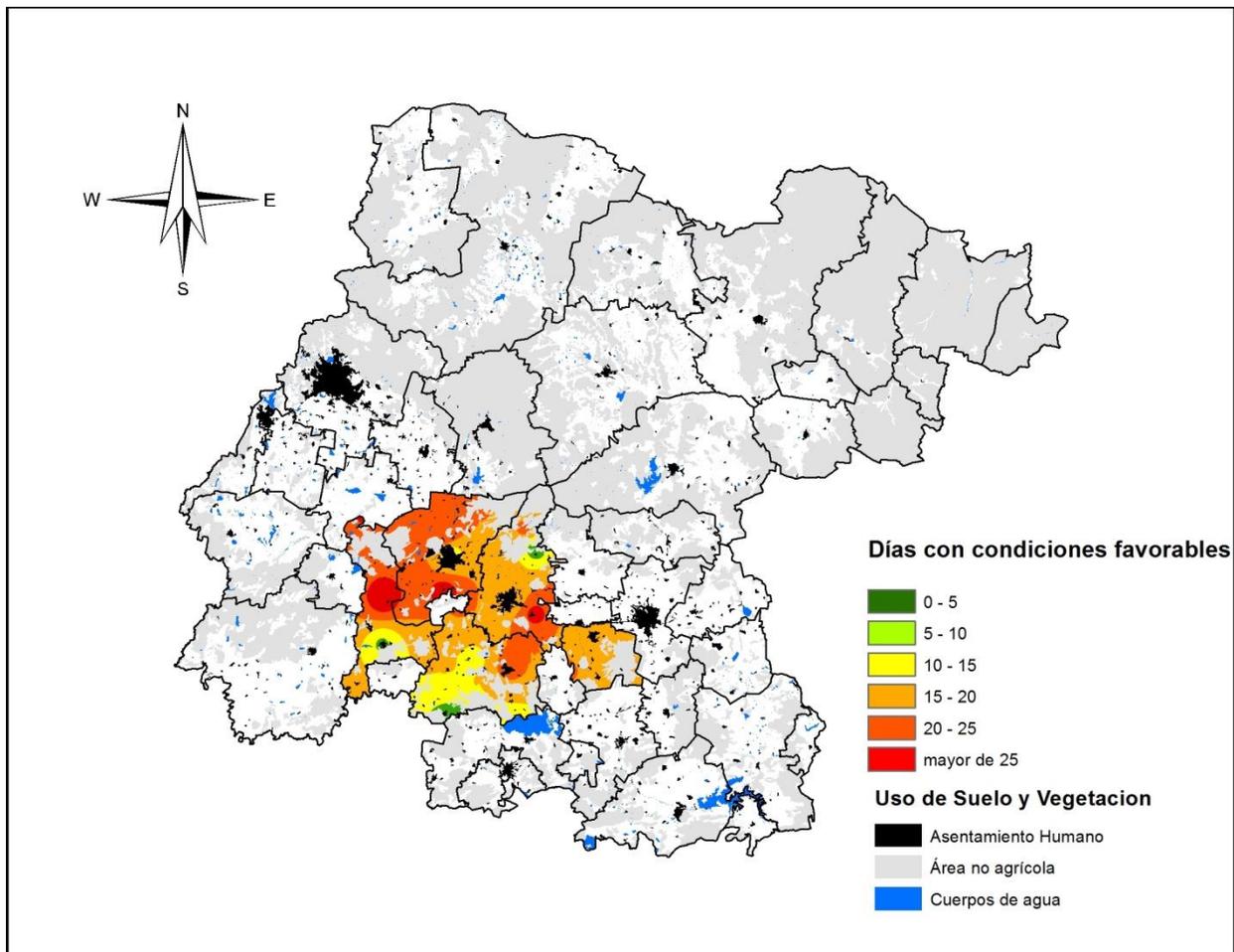


Figura 17. Delimitación de riesgo a roya lineal en zonas de producción de cebada en Guanajuato, en función de los días con condiciones meteorológicas favorables para la infección en el mes de marzo. Aunque se observan zonas reducidas con más de 25 días, la mayor parte de la zona de cebada sigue presentando al menos 10 días con condiciones favorables para la infección de roya lineal, con muy pequeñas porciones de Abasolo, Valle de Santiago y Salamanca entre 0 y 5 días.

CONCLUSIONES

Los cambios en la incidencia y severidad de la roya lineal pueden ser muy contrastantes de un ciclo a otro y están directamente afectados por los cambios en las condiciones meteorológicas. El modelo de simulación generado es una herramienta que permite representar cuantitativamente estos cambios, facilitando el entendimiento de las variaciones en el comportamiento de esta enfermedad de un ciclo a otro, lo cual permite tomar medidas de control de manera oportuna.

BIBLIOGRAFÍA

- Davis, R.M. & Jackson, L. F. (2002) UC IPM Pest Management Guidelines: Small Grains Stripe Rusts of Wheat and Barley, Pathogen: *Puccinia striiformis*.
- Dubin, H.J. & Stubbs, R.W. (1986). Epidemic Spread of barley Stripe Rust in South America. *Plant Disease* 70:141-144.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (en línea). Disponible en: <http://faostat.fao.org>
- Hollaway, G. (2005). Stripe Rust Management: Update. *Agriculture Notes*, August.
- Islas, G. J.; Zamora, D. M.; Gámez, V. F. P. y Solano, H. S. 2008. Rentabilidad de la cebada de riego en El Bajío *In*: III Reunión Nacional de Innovación Agrícola y Forestal. Yucatán, México. Memoria. 260 p.
- Line, R. F. (2002). Stripe rust of wheat and barley in North America: A retrospective historical review. *Annual Review of Phytopathology*.
- López-Lozano, R. y Casterad, M.A. (2003): “Una aplicación SIG para seguimiento en una parcela mediante NDVI de irregularidades en el desarrollo del cultivo”, en Pérez, R. y Martínez, P. (Ed.). *Teledetección y desarrollo regional*. X Congreso Nacional de Teledetección. Cáceres, pp.9-12.
- Medina, G. 2008. Uso de Estaciones Meteorológicas en la Agricultura. Folleto Informativo Núm. 50 INIFAP.

- Park, R. (2000). Rust Fungi. Encyclopedia of Microbiology, Volume 4 Second Edition Academic Press. pp 195-211.
- Rabbinge R., Ward S. A. y van Laar H. H., 1989. Simulation and Systems Management in Crop Protection. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), Wageningen, the Netherlands.
- Robinson R. A., 1987. Host Management in Crop Pathosystems. Macmillan Publishing Company, New York, USA.
- Roelfs, A. P.; Singh R. P.; Saari E. E. 1992. Las Royas del Trigo: Conceptos y Métodos para el Manejo de esas Enfermedades. México, D. F. CIMMYT. 81 p.
- Sandoval I., J. S.; Osada K. S.; Vivar F. H., y Benítez R. 1999. Correlación entre resistencia en plántula y resistencia en planta adulta a la roya amarilla y a la escaldadura de la cebada. Agrocienca 33: 415-422.
- SIAP. Cebada grano (en línea). Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=121&Itemid=74
- SIAP. Cierre de la producción agrícola por Estado (en línea). Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351.
- SIAP. Cierre de la producción agrícola por cultivo (en línea). Disponible en: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350.
- Stubbs, R. W. 1988. Pathogenicity analysis of yellow (stripe) rust of wheat and its significance in a global context. In: Breeding Strategies for Resistance to the Rust of Wheat. Simmonds N.W., and S. Rajaram (eds). CIMMYT. México, D. F. pp: 23-38.