

Efecto del cambio climático sobre las zonas de riesgo por marchitez en el *Agave tequilana* Weber variedad Azul en Jalisco*

Effect of climate change on risk areas by wilting in *Agave tequilana* Weber Blue variety in Jalisco

Hugo Ernesto Flores López^{1§}, Álvaro Agustín Chávez Durán¹, José Ariel Ruíz Corral¹, Celia de la Mora Orozco¹ y Víctor Manuel Rodríguez Moreno²

¹Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-INIFAP. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. C. P. 47600 Tel. 01 800 0882222. (chavez.alvaro@inifap.gob.mx; ruiz.ariel@inifap.gob.mx; delamora.celia@inifap.gob.mx). ²Campo Experimental Pabellón-Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos. km 32.5, carretera Aguascalientes- Zacatecas, C. P. 20660, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. (rodriguez.victor@inifap.gob.mx). [§]Autor para correspondencia: flores.hugo@inifap.gob.mx.

Resumen

El agave tequilero es la materia prima para elaborar el tequila producido en la zona de denominación de origen del tequila (DOT), comprende el estado de Jalisco y algunos municipios de los estados de Nayarit, Guanajuato, Michoacán y Tamaulipas. La marchitez del agave causada por *Fusarium oxysporum* es uno de los problemas fitosanitarios que enfrenta el cultivo en la DOT, el cual persiste actualmente. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del cambio climático en Jalisco sobre la marchitez del agave tequilero con base en el uso de índices bioclimáticos. Se utilizó la información del monitoreo de predios con agave tequilero durante 1997-1998 y 2008-2009, generadas para la identificación de zonas de riesgo por marchitez (ZRM) y asociadas con el clima de 1961 a 1995 y 1961 a 2008. Se involucró la temperatura, la humedad del suelo y la duración de las condiciones de humedad en el suelo adecuadas para que ocurran ciclos de marchitez en agave. Los resultados mostraron relación entre las ZRM con los índices bioclimáticos de los monitoreos de agave en 1997-1998 y 2008-2009. El 23.3% de la superficie aumentó su nivel de riesgo, 50.5% de la superficie se mantuvo sin cambio y 26.2% del área redujo su nivel de riesgo. Este resultado representa el efecto del cambio climático sobre las ZRM

Abstract

Tequila agave is the raw material for tequila, produced in the area of appellation of origin of tequila (DOT), comprising the state of Jalisco and some municipalities in the states of Nayarit, Guanajuato, Michoacan and Tamaulipas. Agave wilt caused by *Fusarium oxysporum* is one of phytosanitary problems facing producer in DOT, which persists today. The aim of this study was to evaluate the effect of climate change in Jalisco on tequila agave wilt based on the use of bioclimatic indexes. Monitoring information from fields with tequila agave from 1997-1998 and 2008-2009, generated to identify areas at risk by wilting (ZRM) and associated with the weather from 1961 to 1995 and 1961 to 2008 was used. It involved temperature, soil moisture and duration of moisture conditions that could favor wilt cycles in agave. The results showed relationship between ZRM with bioclimatic indices from the monitoring of agave in 1997-1998 and 2008-2009. 23.3% of the area increased their risk level, 50.5% of the area was unchanged and 26.2% of the area reduced their risk level. This result represents the effect of climate change on ZRM in Jalisco, but you need to use future climate change scenarios to project the trend of these changes in areas at risk by *fusarium* in DOT to produce tequila agave.

* Recibido: noviembre de 2015
Aceptado: febrero de 2016

en Jalisco, pero es necesario utilizar escenarios futuros de cambio climático para proyectar la tendencia de estos cambios en las zonas de riesgo por *Fusarium* en la DOT para producir agave tequilero.

Palabras clave: *Fusarium oxysporum*, agave tequilero, cambio climático, índices bioclimáticos.

Introducción

El agave tequilero es la materia prima para elaborar el tequila, producto de alta demanda nacional e internacional con una producción de más de 242.2 millones de litros de tequila con 0.7882 millones de toneladas de agave en 2014 (CRT, 2015). El agave tequilero se produce en la denominación de origen del tequila (DOT), comprende el estado de Jalisco y algunos municipios de los estados de Nayarit, Guanajuato, Michoacán y Tamaulipas. La dinámica de la superficie de siembra con agave tequilero ha mostrado una tendencia a incrementarse debido a la elevada demanda de tequila (SIAP-SAGARPA, 2015). Sin embargo, la producción de agave en la DOT ha mostrado irregularidad en los últimos años por factores como el crecimiento incontrolado de la superficie plantada con agave, ciclos de sobreproducción y escasez de agave, presencia de problemas fitosanitarios diversos, falta de tecnología apropiada a las condiciones socioeconómicas de los productores agaveros, que a su vez repercute en una productividad contrastante entre zonas y deterioro de los recursos naturales, en especial la pérdida de suelo.

La marchitez es uno de los problemas fitosanitarios que enfrenta el agave tequilero, pero que se acentúa cuando existe sobreproducción de manera que el precio del agave baja y el cultivo es abandonado, y cuando hay escasez de agave este problema se reduce, porque la demanda de la industria del tequila absorbe todo el agave cultivado; aun así, el problema fitosanitario de la marchitez del agave persiste.

La marchitez del agave se atribuye a *Fusarium oxysporum* (Rubio, 2007), hongo fitopatógeno del suelo ampliamente distribuido en las áreas de cultivo y reportado en cultivos como tomate (Larkin y Fravel, 2002), césped (Goldberg, 2006), palma de aceite (Flood, 2006), chícharo (Landa *et al.*, 2001; Landa *et al.*, 2006), algodón (DeVay *et al.*, 1997), plátano (Ploetz, 2006), plántulas de pino blanco (Ocamb and Juzwik, 1995), entre otros.

Keywords: *Fusarium oxysporum*, agave tequila, bioclimatic indices, climate change.

Introduction

The tequila agave is the raw material to elaborate tequila, a product of high national and international demand with a production over 242.2 million liters of tequila with 788 200 t of agave in 2014 (CRT, 2015). Agave tequila is produced in the appellation of origin of tequila (DOT), comprising the state of Jalisco and some municipalities in the states of Nayarit, Guanajuato, Michoacan and Tamaulipas. The dynamics of the area planted with agave tequila has shown a tendency to increase due to the high demand of tequila (SIAP-SAGARPA, 2015). However, the production of agave in DOT has shown irregularities in recent years by factors such as uncontrolled growth of the planted area with agave, overproduction and shortage of agave, presence of various plant health problems, lack of appropriate technology to the socioeconomic conditions for agave producers, which in turn affects productivity between contrasting areas and deterioration of natural resources, especially soil loss.

Wilt is one of phytosanitary problems facing tequila agave, but accentuated when there is overproduction so that the price of agave decreases and the crop is abandoned, and when there is shortage of agave this problem is reduced, because the demand for the tequila industry absorbs all the agave grown; still, the phytosanitary problem of agave wilt persists.

Agave wilt is attributed to *Fusarium oxysporum* (Rubio, 2007), phytopathogenic fungus widely distributed in cultivation soils and reported in crops like tomatoes (Larkin and Fravel, 2002), lawn (Goldberg, 2006), oil palm (Flood, 2006), pea (Landa *et al.*, 2001; Landa *et al.*, 2006), cotton (DeVay *et al.*, 1997), banana (Ploetz, 2006), white pine seedlings (Ocamb and Juzwik, 1995), among others.

Nelson (1981) mentioned that wilt symptoms by fusarium in herbaceous plants, consists of an incipient wilting of lower leaves or buds. Subsequently come chlorosis in lower leaves followed by permanent wilting of these leaves. Symptoms appear gradually in the youngest leaves of the plant, often occurring on one side of the same. Finally the affected part of the plant withers and dies. This process differs in perennial

Nelson (1981) mencionó que los síntomas de marchitez por fusarium en plantas herbáceas, consiste en un marchitamiento incipiente en las hojas inferiores o brotes. Posteriormente es acompañado de clorosis en las hojas inferiores seguido por marchitamiento permanente de estas hojas. Los síntomas aparecen gradualmente en las hojas más jóvenes de la planta, ocurriendo a menudo en un lado de esta. Finalmente la parte afectada de la planta se marchita y muere. Este proceso difiere en cultivos perenes, como banano, palma datilera, mimosa, entre otros. En plantas herbáceas el desarrollo de la enfermedad ocurre en días, mientras que en plantas leñosas, como el banano, se desarrolla de 2 a 5 meses (Nelson, 1981).

Estas características de la marchitez por fusarium son observadas en el agave tequilero y se reporta como el problema fitosanitario de mayor incidencia en Jalisco (CRT, 2010). *F. oxysporum* ataca a las plantas de agave sin importar su desarrollo; inicia con una palidez en las hojas, principalmente en la base de la piña y apretando el cogollo, hojas que posteriormente se marchitan, afectando la base de la piña y produciendo la muerte de la planta (Flores *et al.*, 2010). Este marchitamiento del agave es el resultado de una serie de ciclos de infección por parte de fusarium, que considera procesos de infección, colonización y sobrevivencia (Nelson, 1981).

Los ciclos de infección se desarrollan en tiempo y espacio, de manera suave o severa, explosiva o sutil, con la interacción del hospedero y disparados por el ambiente (clima y suelo) o la interferencia del hombre, los cuales operan en diferentes niveles (Kranz y Hau, 1980) o subprocesos (Zadoks y Schein, 1979).

Dentro del componente clima del sistema epidemiológico de la marchitez por fusarium, la temperatura y la humedad del suelo son principalmente los factores primarios que regulan los ciclos de infección (Nelson, 1981) y en especies de fusarium con acción aérea, la actividad del agua en el follaje es importante (Marín *et al.*, 1995; Ramírez *et al.*, 2005). La temperatura requerida por las especies de fusarium para desarrollar ciclos de infección es muy variable. Katan (1989) resume el crecimiento relativo de *F. oxysporum* en función de la temperatura en el modelo mostrado en la Figura 1. La temperatura para el crecimiento óptimo de *F. oxysporum* en el suelo se define entre 25 y 28 °C, con crecimiento desde los 15 a 38 °C (Smith *et al.*, 1988; Katan, 1989). Dependiendo del cultivo, otras especies de fusarium tienen un óptimo de temperatura entre 22 a 28 °C y rangos extremos entre 2 y 39 °C (Lacey, 1989). Timmer (1982) encontró que el *F. oxysporum* en cítricos

crops such as banana, date palm, mimosa, among others. In herbaceous plants, the disease occurs in days, while in woody plants such as bananas develops in 2-5 months (Nelson, 1981).

These wilt characteristics of fusarium are observed in tequila agave and is reported as the most prevalent phytosanitary problem in Jalisco (CRT, 2010). *F. oxysporum* attacks agave plants regardless of their growth; begins with a pale leaf, mainly in the core of pineapple and pushing the whorl, leaves that subsequently wilt, affecting the core of pineapple causing plant death (Flores *et al.*, 2010). Wilting in agave is the result of a series of cycles of infection by fusarium, which considers infection processes, colonization and survival (Nelson, 1981).

The cycles of infection develop in time and space, mild or severe, explosive or subtle, host interaction and triggered by the environment (soil and climate) or human interference, which operate at different levels (Kranz and Hau, 1980) or sub process (Zadoks and Schein, 1979).

Within the climate component from the epidemiological system by fusarium, temperature and soil moisture are the main primary factors governing the cycles of infection (Nelson, 1981) and Fusarium species with aerial action, water activity on the foliage is important (Marín *et al.*, 1995; Ramírez *et al.*, 2005). The temperature required for fusarium species to develop cycles of infection varies widely. Katan (1989) summarizes the relative growth of *F. oxysporum* in function of the temperature on the model shown in Figure 1. The temperature for optimum growth of *F. oxysporum* in the soil is defined between 25 and 28 °C, with growth from 15 to 38 °C (Smith *et al.*, 1988; Katan, 1989). Depending on the crop, other fusarium species have an optimum temperature between 22 to 28 °C and extreme ranges between 2 and 39 °C (Lacey, 1989). Timmer (1982) found that the *F. oxysporum* on citrus showed the greatest severity between 21 to 26 °C, with significant decrease with temperature below 15 °C and higher than 32 °C. In coca plant, fusarium showed optimal development at 25 °C, with extremes between 10 and 35 °C (Fravel *et al.*, 1996).

Soil moisture complements suitable temperature conditions to generate infection cycles by pathogens. *F. oxysporum* is an aerobic fungus, with requirements of soil moisture for optimum growth and survival near field capacity, but under saturation or flood conditions, its population is reduced (Nelson, 1981). Depending on the physical characteristics

mostró la mayor severidad entre 21 a 26 °C, con disminución significativa con temperatura menor a 15 °C y mayor 32 °C. En planta de coca, fusarium mostró un desarrollo óptimo a 25 °C, con extremos entre 10 y 35 °C (Fravel *et al.*, 1996).

La humedad del suelo complementa las condiciones de temperatura adecuadas para generar ciclos de infección por patógenos. *F. oxysporum* es un hongo de ambiente aeróbico, con requerimiento de humedad en el suelo para crecimiento óptimo y sobrevivencia cerca de capacidad de campo del suelo, pero en condiciones de saturación o inundación se reduce su población (Nelson, 1981). Dependiendo de las características físicas del suelo, se reportan potenciales matriciales óptimos de humedad en el suelo para fusarium desde -10 kPa hasta -100 kPa, con menor proliferación a -500 kPa (Fravel *et al.*, 1996). La actividad del agua es un elemento importante en los ciclos de infección de fusarium, reportándose valores óptimo en 0.98 y mínimo de 0.87 (Lacey, 1989; Carrillo, 2003). La interacción temperatura-humedad del suelo es importante en los ciclos de infección, Katan (1989) mencionó que en melón la incidencia de marchitez por fusarium, la temperatura está asociada con la humedad del suelo y la concentración de inóculo, de manera que el nivel de enfermedad en suelo húmedo fue más alto a bajas temperaturas y con suelo seco resultó alta en bajas y alta temperaturas (Fravel *et al.*, 1996).

Los componentes del sistema epidemiológico para fusarium actúan bajo una estructura sistémica y son constituidos por elementos biológicos básicos, sistema de control de fitosanitario, sistemas de manejo de cultivo y agroecosistema (Kranz y Hau, 1980). Las interacciones resultantes entre estos elementos generan una complejidad de tal magnitud, que dificultan su entendimiento, la operación y el control fitosanitario adecuado en el cultivo. Si se involucra una perspectiva espacial más amplia, como la DOT, los cambios tecnológicos y ambientales ocurridos en los últimos años modifican la frontera donde los problemas fitosanitarios se presentan, como la dinámica de marchitez reportada mencionada por el CRT (2010).

La finalidad principal de los estudios de cambio climático en la agricultura es la estimación de los cambios esperados en las condiciones meteorológicas y su influencia en los organismos vivos, el cambio de la concentración de CO₂ en la atmósfera, entre otros (Manici *et al.*, 2014). El efecto del cambio climático sobre cultivos y patógenos del suelo como *F. oxysporum*, requiere entenderse para anticipar las modificaciones pertinentes en el manejo agrícola y los ecosistemas, pues las modificaciones espaciales y temporales

of the soil, optimum matrix potential of soil moisture have been reported for fusarium from -10 kPa to -100 kPa, with less proliferation -500 kPa (Fravel *et al.*, 1996). Water activity is an important element in cycles of infection of fusarium, reporting optimal values in 0.98 and minimum of 0.87 (Lacey, 1989; Carrillo, 2003). Temperature-soil moisture interaction is important in the cycle of infection, Katan (1989) mentioned that in melon the incidence of wilt by fusarium, the temperature is associated with soil moisture and inoculum concentration; so that the disease level on wet soil was higher at low temperatures and with dry soil was high in low and high temperatures (Fravel *et al.*, 1996).

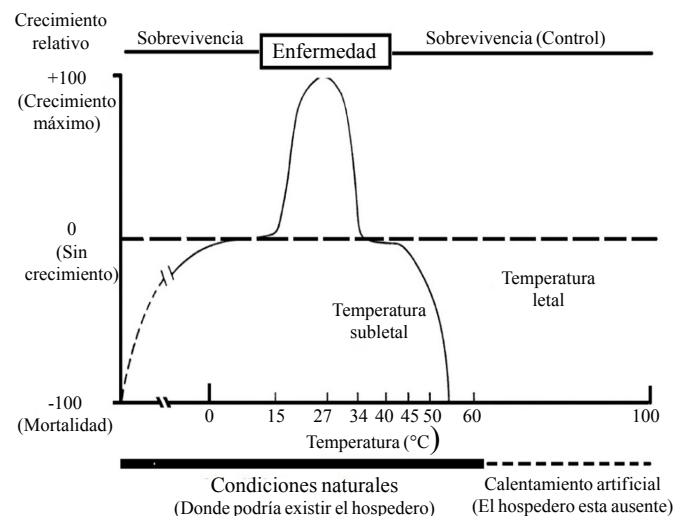


Figura 1. Crecimiento relativo de *Fusarium oxysporum* en función de la temperatura (adaptado de Katan, 1989).
Figure 1. Relative growth of *Fusarium oxysporum* in function of the temperature (adapted from Katan, 1989).

Epidemiological system components for fusarium act under a systemic structure and are made up of basic biological elements, plant health control system, farming systems and agro-ecosystem management (Hau and Kranz, 1980). The resulting interactions between these elements generate a complexity of such magnitude that hinders their understanding, operation and adequate control in the crop. If a broader spatial perspective is involved, as the DOT, technological and environmental changes occurred in recent years modify the frontier where phytosanitary problems arise, as reported wilt dynamics mentioned by the CRT (2010).

The main purpose of the studies of climate change on agriculture is to estimate the expected changes in weather and its influence on living organisms, changes in the

del clima generan respuestas en los patógenos y los cultivos agrícolas que requieren identificarse (Shaw y Osborne, 2011). Esto se complica por el poco conocimiento relacionado con la complejidad de las interacciones clima-hospedero-patógenos-plaga y el daño agronómico, la especificidad de los ataques patógeno-hospedero, la diversidad de patógenos (hongos, bacterias o virus) y la secuencia de estreses inducidos por el clima que incrementan la susceptibilidad del hospedero al patógeno aumentando sus efectos (Grulke, 2011).

Una manera de abordar la escasez de información sobre la relación clima-hospedero-patógeno ante condiciones de cambio climático, es usar información histórica de estas relaciones que pudieran dar luz sobre estas interacciones. En el agave tequilero, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ha desarrollado estudios en Jalisco (Flores, 2000; Flores *et al.*, 2009), con resultados útiles para dilucidar parte de la interacción clima-hospedero-patógeno ante la influencia del cambio climático y la asociación con el problema fitosanitario de marchitez en la DOT. Estos estudios pueden utilizarse para identificar los cambios ambientales que están ocurriendo asociados a este cultivo y el riesgo fitopatológico por fusarium en las zonas productoras de agave, para tomar las medidas pertinentes y reducir o evitar el riesgo en el suministro de materia prima para la cadena agave-tequila. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del cambio climático en Jalisco sobre la marchitez del agave tequilero, con base en el uso de índices obtenidos del monitoreo de predios con agave tequilero durante 1997-1998 y 2008-2009.

Materiales y métodos

El presente análisis se realizó para el estado de Jalisco, localizado en la región pacífico centro de México. Se utilizaron dos estudios de INIFAP sobre la marchitez del agave tequilero en los periodos de 1997 a 1998 y 2008 a 2009. En estos estudios se utilizó el modelo Productor-Experimentador (Villarreal, 2000) como método de diagnóstico para identificar el nivel de marchitez presente. En el periodo 1997-1998 los predios monitoreados fueron 97 y en el periodo 2008-2009 fueron 105. La edad de las plantaciones con agave fue de 1 a 7 años para ambos periodos de monitoreo, con diferentes niveles de tecnología de producción. La distribución de los predios en el estado de Jalisco para los periodos de análisis se muestra en la Figura 2.

concentration of CO₂ in the atmosphere, among others (Manici *et al.*, 2014). The effect of climate change on crops and soil pathogens such as *F. oxysporum* requires understanding to anticipate pertinent changes in agricultural management and ecosystems, spatial and temporal modification in climate generate responses in pathogens and crops that require to be identified (Shaw and Osborne, 2011). This complicates by the lack of knowledge related to the complexity of host-pathogen-climate-pest interaction and agronomic damage, the specificity of host-pathogen attacks, diversity of pathogens (fungi, viruses or bacterias) and sequence of induced stresses by climate that increase host susceptibility to the pathogen increasing its effects (Grulke, 2011).

One way to address the shortage of information on climate-host-pathogen relationship under conditions of climate change is to use historical information of these relationships that could provide understanding on these interactions. In the tequila agave, the National Institute of Forestry, Agriculture and Livestock Research (INIFAP) has conducted studies in Jalisco (Flores, 2000; Flores *et al.*, 2009), with useful results to elucidate part of the pathogen climate-host-interaction under the influence of climate change and the partnership with the phytosanitary problem of wilting in DOT. These studies can be used to identify environmental changes that are occurring associated to this crop and plant pathology risk by fusarium in agave growing areas, to take appropriate measures to reduce or avoid risk in the raw material supply chain agave-tequila. The aim of this study was to evaluate the effect of climate change in Jalisco on wilt of agave tequila, based on the use of indices obtained from field monitoring of tequila agave during 1997-1998 and 2008-2009.

Materials and methods

This analysis was made for the state of Jalisco, located in the pacific center region of Mexico. Two studies from INIFAP on tequila agave wilt in the period 1997-1998 and 2008 to 2009 were used. In this study the Producer-Experimenter model (Villarreal, 2000) was used as a diagnostic method to identify the level of wilting present. In the period 1997-1998, 97 fields were monitored and in 2008-2009 were 105. The age of the agave plantations was 1-7 years for both monitoring periods, with different

Los predios seleccionados con agave tequilero tuvieron una superficie de una hectárea con plantas de 1 a 7 años. En esta superficie se marcaron 50 plantas con distribución en cinco de oros con grupos de 10 plantas cada punto. Se utilizaron índices bioclimáticos asociados a la presencia de marchitez. En el periodo de monitoreo de 1997-1998 se utilizó el número de hojas enrolladas, registradas desde el mes de julio de 1997 a enero de 1998. En el periodo de 2008 a 2009 se registró el número de hojas emergidas desde el mes de julio de 2008 a enero de 2009.

En el periodo 1997-1998 se utilizó el índice tasa de hojas enrolladas (THE), como indicador de la marchitez en agave, expresado por la relación siguiente: $THE = \frac{(HE_2 - HE_1)}{(T_2 - T_1)}$, donde HE_1 es el número de hojas enrolladas al inicio del estudio, HE_2 es número de hojas a enero de 1998, $(t_2 - t_1)$ es el número de días transcurridos en el periodo de registro de hojas enrolladas.

En el periodo 2008-2009 se utilizó el índice tasa de emergencia de hojas (TEH), como indicador de crecimiento del agave, expresado por la relación siguiente: $TEH = \frac{(EH_2 - EH_1)}{(T_2 - T_1)}$, donde EH_1 es el número de hojas emergidas del cogollo del agave tequilero al inicio del estudio, EH_2 es número de hojas emergidas a enero de 2009, $(t_2 - t_1)$ son los días transcurridos en el periodo de monitoreo de hojas de agave.

Zonas de riesgo por marchitez

La identificación de las zonas de riesgo fitopatológico por marchitez en Jalisco se basó en el modelo de potencial productivo para identificar zonas adecuadas para la producción de cultivos (Flores *et al.*, 2014). Este modelo compara los requerimientos ambientales del patógeno para generar ciclos de infección y la disponibilidad ambiental de estos requerimientos. Se consideró que la marchitez es provocada por *F. oxysporum* (Rubio, 2007), con ciclos de infección generados por la combinación de temperatura, humedad del suelo y el tiempo de exposición a estas condiciones ambientales, como se describe a continuación:

1) Se utilizaron las temperaturas máxima y mínima del aire en periodos decenales de las estaciones climatológicas mostradas en la Figura 2; 2) los requerimientos agroclimáticos (RA) para ciclos de infección de *F. oxysporum* ocurren entre la temperatura 11 y 32 °C. La temperatura mínima debe ser mayor a 11 °C y la temperatura máxima menor

levels of production technology. The distribution of field in the state of Jalisco for the periods of analysis is shown in Figure 2.

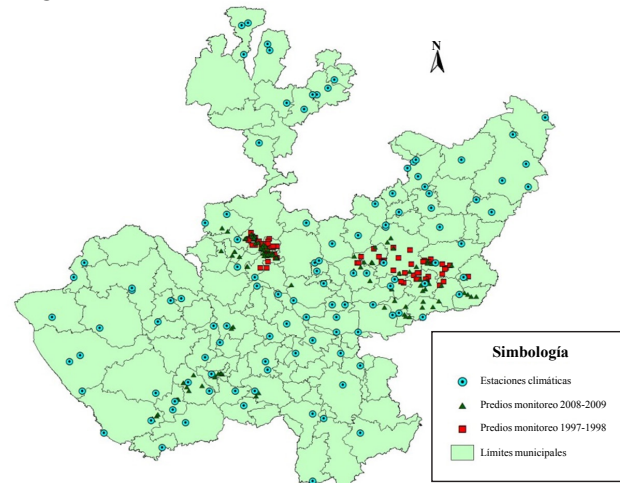


Figura 2. Distribución de predios con agave tequilero monitoreados en 1997-1998 y 2008-2009 y la distribución de estaciones climáticas en Jalisco.

Figure 2. Distribution of fields with agave tequila monitored in 1997-1998 and 2008-2009 and distribution of weather stations in Jalisco.

Fields selected with agave tequila had an area of one hectare with plants of 1-7 years. On these surface 50 plants were marked with distribution in five golds with groups of 10 plants each point. Bioclimatic indices associated with the presence of wilting were used. During the monitoring period 1997-1998 the number of rolled leaves, registered from July 1997 to January 1998 were used. In the period 2008-2009 the number of leaves emerged from the month of July 2008 to January 2009 were recorded.

In the period 1997-1998 rolled leaves rate (THE) index was used as wilt indicator in agave, expressed by the following relationship: $THE = \frac{(HE_2 - HE_1)}{(T_2 - T_1)}$, where HE_1 is the number of rolled leaves at the beginning of the study, HE_2 is number of leaves to January 1998, $(t_2 - t_1)$ is the number of passing days in the recording period rolled leaves.

In the period 2008-2009 the leaf emergence rate (TEH) index was used as an indicator of agave growth, expressed by the following relationship: $TEH = \frac{(EH_2 - EH_1)}{(T_2 - T_1)}$, where EH_1 is the number of emerged leaves of the whorl from the agave plant at the beginning of the study, EH_2 is the number of emerged leaves to January 2009, $(t_2 - t_1)$ are the passing days in the monitoring period of agave leaves.

a 32 °C. Durante estos ciclos de infección debe tenerse humedad disponible en el suelo igual o mayor a 80%. La disponibilidad de humedad del suelo se evaluó con un balance de humedad climatológico decenal (Flores, 1994), para cada una de las estaciones climáticas mostradas en la Figura 2; 3) la caracterización decenal del clima en mapas raster se realizó con las series históricas de las estaciones mostradas en la Figura 2 en los periodos 1961 a 1995 (ZR95) y 1961 a 2008 (ZR08); 4) la combinación de temperatura, humedad del suelo y tiempo de duración de estas condiciones, generaron tres niveles de riesgo por marchitez en agave (RMA) como se describe a continuación: a) riego bajo, tiene menos de tres decenas con RA; b) riesgo medio, tiene de tres a 11 decenas con RA; c) riesgo alto, tiene más de 12 decenas con RA; y 5) la evaluación de los niveles de RMA se asociaron con los índices bioclimáticos obtenidos para cada predio procedentes del monitoreo de agave tequilero con síntomas de marchitez y crecimiento de hojas en los periodos de 1997-1998 y 2008-2009.

Información de clima y suelo utilizados, y generación de mapas de riesgo por marchitez

Los datos de clima que se utilizaron procedieron de las 110 estaciones climatológicas de la Comisión Nacional del Agua (CNA) con información diaria de temperatura máxima, mínima, precipitación y evaporación, localizadas en Jalisco y distribuidas como se muestra en la Figura 2. La información climatológica promedio decenal de cada estación climática se generó usando el programa SICA 2.0 (Medina y Ruíz, 1992). La preparación de las bases de datos de cada estación climatológica para interpolación, se realizó en la hoja de cálculo Excel. Las características del suelo para el balance de agua se obtuvieron de los perfiles de suelo de INEGI para el estado de Jalisco. Los mapas raster decenales de temperaturas máximas y mínimas, y humedad del suelo disponible para Jalisco para las 36 decenas del año, se generaron con procedimientos de interpolación en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ARCVIEW 3.2a. La identificación de las zonas RMA utilizaron el SIG IDRISI Selva mediante el uso de álgebra de mapas. La presentación final de los mapas de RMA se realizó en el SIG ARCGIS 10.1.

Análisis de efecto del cambio climático en la marchitez del agave

En los mapas de riesgo por marchitez para el agave tequilero de las ZR95 y ZR08 de Jalisco, se ubicaron los predios del periodo de monitoreo de 1997-1998 y 2008-2009, para identificar el nivel de riesgo a que estaba sujeto cada predio.

Wilt risk areas

The identification of phyto pathological risk areas by wilt in Jalisco was based on the productive potential model to identify suitable areas for crop production (Flores *et al.*, 2014). This model compares the environmental requirements of the pathogen to generate cycles of infection and environmental availability of these requirements. It was considered that wilt is caused by *F. oxysporum* (Rubio, 2007), with cycles of infection generated by the combination of temperature, moisture level and time of exposure to these environmental conditions, as described below:

1) The maximum and minimum air temperatures were used in decadal periods from the meteorological stations shown in (Figure 2; 2) agro-climatic requirements (RA) for cycles of infection of *F. oxysporum* require temperature between 11 and 32 °C. The minimum temperature must be above 11 °C and the lowest maximum temperature to 32 °C. During these cycles of infection must be available soil moisture equal to or greater than 80%. The availability of soil moisture was evaluated with a decadal climatology moisture balance (Flores, 1994), for each of the stations shown in (Figure 2; 3) decadal climate characterization in raster maps was performed with historical series from the stations shown in Figure 2 in the periods 1961-1995 (ZR95) and 1961-2008 (ZR08); 4) the combination of temperature, soil moisture and duration of these conditions, generated three risk levels by wilt in agave (RMA) as described below: a) low risk, has less than three tens with RA; b) medium risk, has three to 11 tens with RA; c) high risk, has more than 12 tens with RA; and 5) the evaluation of RMA levels were associated with bioclimatic indices obtained for each field from the agave plant monitoring with wilt symptoms and leaf growth in the periods 1997-1998 and 2008-2009.

Climate and soil information used, and generation of risk maps by wilting

Climate data used came from 110 weather stations of the National Water Commission (CNA) with daily information of maximum and minimum temperature, precipitation and evaporation, located in Jalisco and distributed as shown in Figure 2. Average decadal weather information of each weather station was generated using the program SICA 2.0 (Medina and Ruiz, 1992). Database preparation for each weather station for interpolation was performed on Excel. Soil characteristics for the water balance were obtained from soil profiles of INEGI for the state of Jalisco. Decennial

Se utilizó análisis de correlación y regresión para evaluar la relación entre los niveles de RMA y los índices bioclimáticos tasa de hojas enrolladas (the) y tasa de emergencia de hojas (TEH) para los periodo de monitoreo 1997-1998 y 2008-2009, respectivamente.

Resultados y discusión

Zonas de riesgo por marchitez en 1961-1995

En la Figura 3a se muestran las zonas de riesgo por marchitez (ZRM) para ZR95 y en el Cuadro 1, se presenta la superficie ocupada por cada nivel de riesgo en Jalisco. El nivel de riesgo bajo es predominante y está asociado con zonas muy cálidas y secas, como es la costa de Jalisco y el norte y altos norte de Jalisco. Los niveles de riesgo medio y alto se encuentran en las regiones Ciénega, Altos Sur, Valles y Sur de Jalisco.

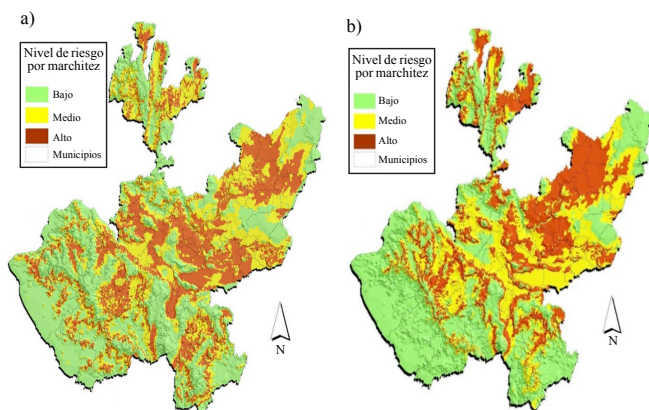


Figura 3. Distribución espacial de las zonas de riesgo por marchitez en agave tequilero en Jalisco, estimado con clima de a) 1961 al 1995; y b) 1961 a 2009.

Figure 3. Spatial distribution of wilt risk areas in tequila agave in Jalisco, estimated with climate from a) 1961 to 1995; and b) 1961-2009.

Cuadro 1. Superficie estimada para los niveles de riesgo por marchitez de agave tequilero para los climas 1961-1998 y 2008-2009.

Table 1. Estimated to risk levels by wilting of agave tequila for climates 1961-1998 and 2008-2009 area.

Nivel de riesgo	Superficie por periodo de análisis (ha)		
	1997-1998	2008-2009	Diferencia 2008-2009 vs 1997-1998
Bajo	3 449 113	3 495 388	46.275
Medio	2 352 772	2 356 071	3.299
Alto	2 072 149	2 022 580	-49.569

raster maps of maximum and minimum temperatures, and soil moisture available for Jalisco for 36 tens of the years were generated with interpolation procedures in the Geographic Information System (GIS) ARCVIEW 3.2a. To identify RMA areas used GIS IDRISI Jungle through map algebra. The final presentation of RMA maps was made in GIS ARCGIS 10.1.

Analysis of climate change effect on agave wilt

On the risk maps by wilt of tequila agave of ZR95 and ZR08 from Jalisco, were located the fields from monitoring periods 1997-1998 and 2008-2009 to identify the risk levels to which each field was subject. Correlation and regression analysis were used to evaluate the relationship between RMA levels and bioclimatic indices of rolled leaves rate (THE) and emergency leaves rate (HST) for the monitoring period 1997-1998 and 2008-2009, respectively.

Results and discussion

Wilt risk areas in 1961-1995

Figure 3a shows the risk areas by wilting (ZRM) for ZR95 and Table 1 shows the area occupied by each risk level in Jalisco. The low risk is prevalent and is associated with very hot, dry areas, such as coastal and northern and high northern of Jalisco. The levels of high and medium risk are found in Cienega, Altos Sur, Valles and Sur regions from Jalisco.

The results of THE index from the monitoring period 1997-1998 were grouped by risk areas and are summarized in Table 2 and the relationship between THE by ZRM are shown in Figure 4. This figure presents the rate change by risk level is 0.0498 leaves / day with highly significant differences between levels of risk.

El resultado del índice THE procedente del monitoreo en el periodo de 1997-1998 se agrupó por zonas de riesgo y se resume en el Cuadro 2 y la relación entre THE por ZRM se muestra en la Figura 4. En esta figura se presenta la tasa de cambio por nivel de riesgo es de 0.0498 hojas/día, con diferencias altamente significativa entre niveles de riesgo.

THE was greater in the high-risk level with 0.0998 leaves / day, in the medium risk area with 0.0098 leaves / day and the lowest in the low risk area with 0.0022 leaves / day. These values are indicators of the dehydration rate of the agave leaves as result of wilt, so that in the high ZRM a leaf rolls every 10 days, while in medium and low ZRM requires over 100 days to roll a leaf.

Cuadro 2. Estadísticas de la tasa de hojas enrolladas (THE) por marchitez del agave tequilero de predios monitoreados durante 1997-1998, ordenados en tres niveles de riesgo para Jalisco.

Table 2. Statistics of rolled leaves rate (THE) by wilt of agave tequila in monitored fields during 1997-1998, sorted into three levels of risk for Jalisco.

Nivel de riesgo	Tasa hojas enrolladas (hojas/día)			
	n	Media	Varianza	CV (%)
Bajo	21	0.0022	0.00077	8
Medio	53	0.0098	0.00062	39.19
Alto	23	0.0998	0.02633	61.49

La THE fue mayor en el nivel de riesgo alto con 0.0998 hojas/día, en la zona de riesgo media con 0.0098 hojas/día y el menor en la zona de riesgo baja con 0.0022 hojas/día. Estos valores son indicadores de la velocidad de deshidratación de las hojas de agave como consecuencia de la marchitez, de manera que la ZRM alta se enrolla una hoja cada 10 días, mientras que en la ZRM media y baja se requieren más de 100 días para enrollar una hoja.

Otro efecto importante observado es la relación entre la THE con la edad del agave tequilero y las ZRM, como se muestra en la Figura 5. En esta figura se observa que la THE para la zona de riesgo bajo se mantiene con un valor mínimo durante los siete años del ciclo de agave. Para la zona de riesgo medio, después del cuarto año la THE comienza a incrementarse hasta el séptimo año donde alcanza el valor mayor. En la zona de riesgo alto se tiene el efecto más intenso de la THE con la edad del agave, en prácticamente todo el ciclo del agave, iniciando desde la plantación del cultivo hasta séptimo año.

Zonas de riesgo por marchitez en 1961-2008

En la Figura 3b se muestran las zonas de riesgo por marchitez para el clima 1961-2008 (ZR08) y el Cuadro 1, indica la superficie ocupada por cada nivel de riesgo en Jalisco. La superficie por zona de riesgo tiene la misma tendencia que en ZR95, solo que en este periodo las zonas

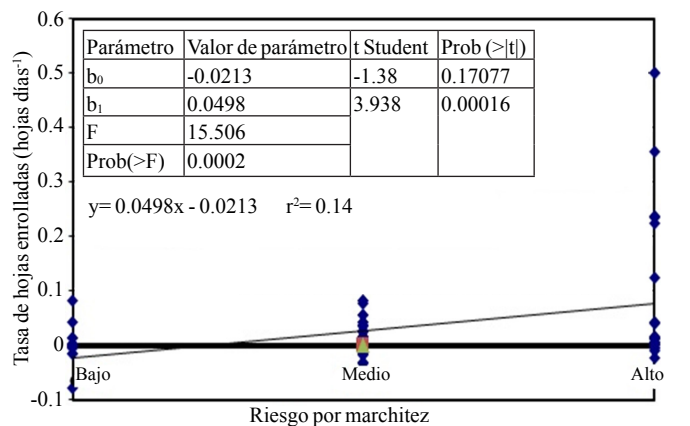


Figura 4. Relación entre las zonas de marchitez de agave tequilero con la tasa de hojas enrolladas de predios monitoreados durante el periodo de 1997-1998 de Jalisco.

Figure 4. Relationship between wilting areas of agave tequila with rolled leaves rate from monitored fields for the period 1997-1998 in Jalisco.

Another important effect is the relationship between THE with agave age and ZRM, as shown in Figure 5. This figure shows that THE for the low-risk area, is maintained at a minimum value during the seven-year of agave cycle. For medium risk area, after the fourth year THE begins to increase until the seventh year where it reaches the highest value. In the high risk area it has the strongest effect of THE with agave age, in virtually the whole agave cycle, starting from planting to the seventh year.

de riesgo bajo y medio aumentan 46 275 y 3 299 ha, respectivamente. En la zona de riesgo alta la superficie se reduce 9 569 ha. Esta puede considerarse el primer indicio del efecto del cambio climático sobre las ZRM del agave tequilero en Jalisco.

Wilt risk areas in 1961-2008

Figure 3b shows risk areas by wilting for climate 1961-2008 (ZR08) and Table 1 indicates the area occupied by each level of risk in Jalisco. The surface by risk zone has the same trend

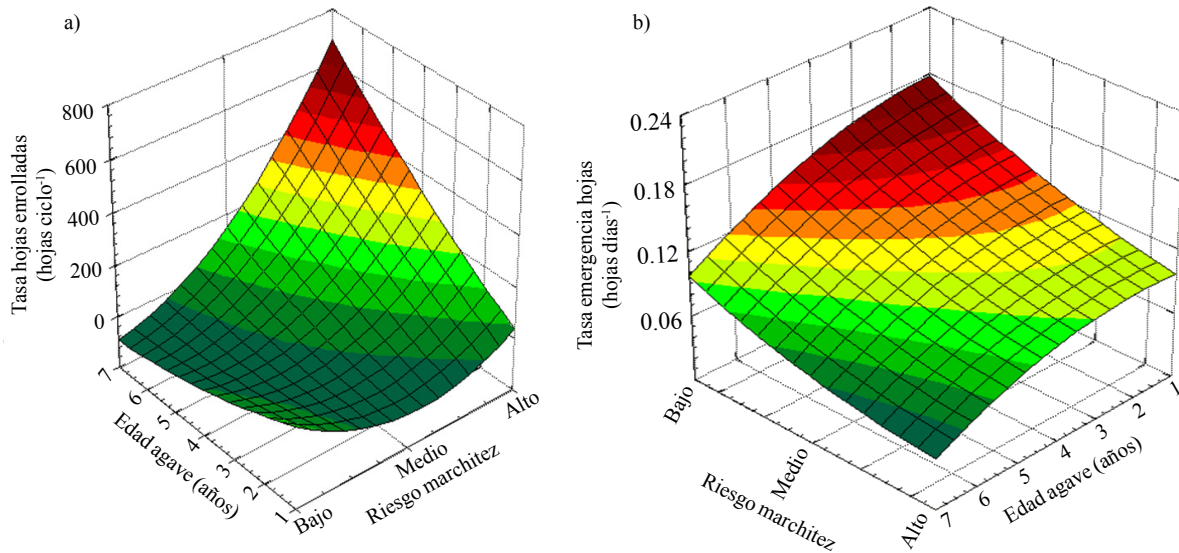


Figura 5. Relación entre las zonas riesgo por marchitez con la tasa de hojas enrolladas y tasa de emergencia de hojas con la edad del agave tequilero, con clima de a) 1961 al 1995; y b) 1961 a 2009, respectivamente.
Figure 5. Relationship between risk areas by wilting with rolled leaves rate and leaf emergence rate with agave age, with climate from a) 1961 to 1995; and b) 1961-2009, respectively.

La identificación de las ZRM en los predios con agave del periodo de 2008-2009, se resumen en el Cuadro 3 y la relación de TEH por ZRM se muestra en la Figura 6. La pendiente en la TEH por nivel de riesgo es de -0.0257 hojas/día. Este valor es altamente significativo entre niveles con tendencia a reducirse con el cambio de ZRM. Los valores promedio de la TEH en las ZRM baja, media y alta es de 0.144 hojas/día, 0.108 hojas/día y 0.097 hojas/día, respectivamente.

as ZR95, but in this period the areas of low and medium risk increase 46 275 and 3 299 ha, respectively. In the high risk zone the surface decreases 9 569 ha. This can be considered the first sign of the effect of climate change on ZRM of tequila agave in Jalisco.

The identification of ZRM in agave fields from the period 2008-2009 are summarized in Table 3 and the relationship of TEH by ZRM are shown in Figure 6. The

Cuadro 3. Estadísticas de la tasa de emergencia de hojas enrolladas (TEH) en agave tequilero de predios monitoreados durante 2008-2009, ordenados en tres niveles de riesgo para Jalisco.

Table 3. Statistics of leaf emergence rate (TEH) in agave tequila from monitored fields during 2008-2009, sorted into three levels of risk for Jalisco.

Nivel de riesgo	Tasa emergencia de hojas (hojas día ⁻¹)			
	n	Media	Varianza	CV (%)
Bajo	40	0.144	0.00306	260
Medio	47	0.108	0.0014	289.5
Alto	18	0.097	0.00137	261.9

La relación de la TEH con la edad del agave y la ZRM se muestra en la Figura 5b. Esta figura muestra que con el avance en la edad de agave, la TEH tiende a disminuir

slope on TEH by risk level is -0.0257 leaves / day. This value is highly significant between levels with tendency to decrease with change of ZRM. The average values

en los tres ZRM, aunque en la ZRM alta la TEH es baja desde los primeros años de la plantación, mientras en la ZRM baja la TEH tiene un valor más elevado (Cuadro 3). Estos valores indican que una hoja se forma en las ZRM baja, media y alta, en 6.95 días, 9.25 días y 10.3 días, respectivamente.

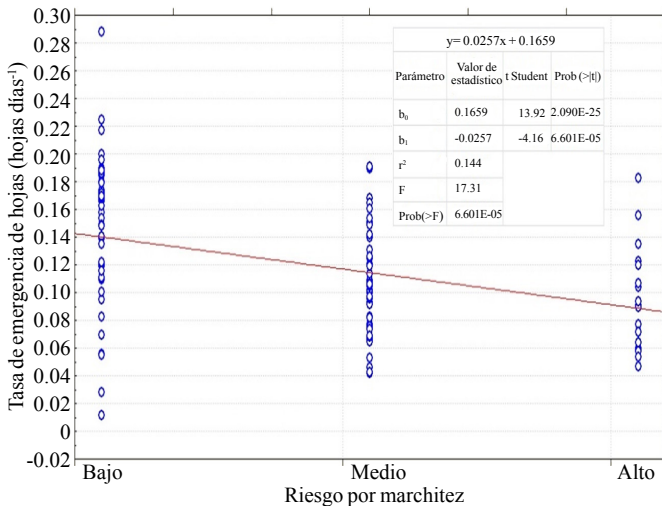


Figura 6. Relación entre las zonas de riesgo por marchitez en agave tequilero con la tasa de emergencia de hojas en predios monitoreados durante el periodo de 2008-2009 en Jalisco.

Figure 6. Relationship between risk areas by wilting in agave tequila with leaf emergence rate on fields monitored during the period 2008-2009 in Jalisco.

Cambio de las zonas de riesgo por marchitez

En la Figura 7 se muestra la distribución del cambio en las ZRM de Jalisco. Este mapa es el resultado de la suma algebraica entre ZRM de ZR95 menos ZR08. Cuando el resultado es positivo, el riesgo por marchitez se reduce uno o dos niveles, con valor cero indican sin cambio de riesgo y el valor negativo representa un aumento en el nivel de riesgo de uno o dos niveles.

En el Cuadro 4 se muestra la superficie afectada por los cambios en la ZRM y los niveles de cambio ocurridos. Las superficies en el cambio de las ZR95 menos ZR08 demuestran que las condiciones agroclimáticas para la marchitez del agave está modificándose en los periodo de análisis y factores geográficos como montañas, cuerpos de agua, zonas áridas, entre otras, definen en gran medida la distribución espacial de la marchitez (Heesterbeek y Zadoks, 1987). Es notorio que el incremento en el riesgo por marchitez está ocurriendo en las partes alta de Jalisco, mientras que en las zonas costeras y de mediana

of TEH in low, medium and high ZRM is 0.144 leaves / day, 0.108 leaves / day and 0.097 leaves / day, respectively.

The relationship of TEH with agave age and ZRM are shown in Figure 5b. This figure shows that with the advance in age of agave, the TEH tends to decrease in the three ZRM, although in high ZRM the TEH is low since the early years of the plantation, while in low ZRM the TEH has a higher value (Table 3). These values indicate that a leaf is formed in low, medium and high ZRM, at 6.95 days, 9.25 days and 10.3 days, respectively.

Change of risk areas by wilting

Figure 7 shows the change in distribution on ZRM from Jalisco. This map is the result of the algebraic sum between ZRM of ZR08 minus ZR95. When the result is positive, the risk by wilting is reduced one or two levels, with zero value indicates no change of risk and negative value represents an increase in the risk level of one or two levels.

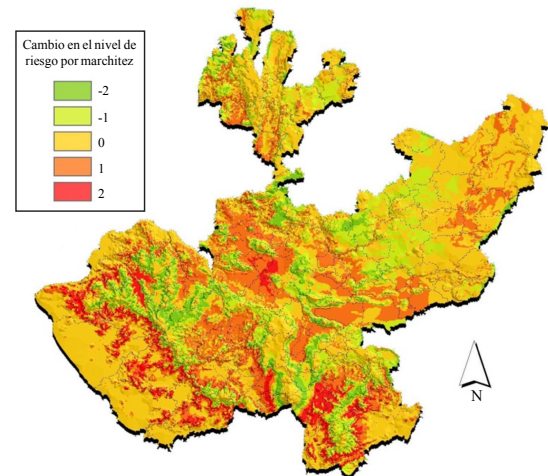


Figura 7. Cambio en el nivel de riesgo por marchitez en agave tequilero, estimado con la comparación de las zonas de riesgo por marchitez para 1997 y 2008.

Figure 7. Change in level of risk by wilt in agave tequila, estimated with the comparison of risk areas by wilting for 1997 and 2008.

Table 4 shows the affected surface by changes in ZRM and levels of change occurring. The surfaces in changing ZR08 minus ZR95 show that agro-climatic conditions for agave wilt is changing in the period of analysis and geographic factors like mountains, water bodies, arid areas, among others, largely define the spatial distribution of wilt (Heesterbeek and Zadoks, 1987). It is noteworthy that the increase in risk by wilting is happening in the high parts of

altitud de menos de 1 500 msnm, el riesgo por marchitez está disminuyendo, resultado atribuido al aumento en la temperatura ambiental.

Jalisco, while in coastal areas and medium altitude of less than 1 500 m, the risk by wilt is decreasing, result attributable to the increase of environmental temperature.

Cuadro 4. Cambio en las zonas de riesgo por marchitez (ZRM), y la superficie que sujeta a cambio en la ZRM, para el periodo de 1997 a 2008.

Table 4. Change in risk areas by wilting (ZRM), and the surface subject to change in ZRM, for the period 1997-2008.

Cambio de ZRM	Descripción	Superficie con cambio de ZR (ha)
-2	Sube dos niveles de riesgo	518 267
-1	Sube un nivel de riesgo	1 318 871
0	Sin Cambio	3 973 132
1	Baja un nivel de riesgo	1 676 279
2	Baja dos niveles de riesgo	387 485

El cambio en las condiciones de clima de ZR95 con respecto a ZR08 para *F. oxysporum* indica que ha sido afectado 49.5% de la superficie de Jalisco, pero al menos 23.3% del área cambio su nivel de riesgo favoreciendo las condiciones agroclimáticas para la marchitez del agave, observado como valores negativos en el cambio de ZRM. Estas tendencias son similares a las mostradas por estudios donde se hacen proyecciones de la modificación del clima y su efecto en cultivos (Masutomi *et al.*, 2009) o patógenos como *F. oxysporum* (Tantaoui *et al.*, 1996; Ferrocino *et al.*, 2014; Shabani *et al.*, 2014).

En los sitios donde la severidad de este problema fitosanitario para el agave es evidente, el riesgo por marchitez debe ser considerado como un factor de reducción de superficie para la producción de materia prima para la industria del tequila. Asimismo, es necesario utilizar escenarios futuros de cambio climático para proyectar como podría ser la tendencia esperada en las zonas de riesgo por fusarium de la DOT para producir agave tequilero.

Conclusiones

La relación entre las zonas de riesgo y el monitoreo de agave en 1997-1998 con el índice bioclimático tasa de hojas enrolladas resultó con una correlación de 0.37 con diferencia altamente significativa ($p > 0.01$). La edad del agave tiene un vínculo estrecho con la THE y las zonas de riesgo por marchitez.

The change in climate conditions of ZR08 regarding ZR95 for *F. oxysporum*, indicates that has been affected 49.5% of the area from Jalisco, but at least 23.3% of the area changed their level of risk, favoring agro-climatic conditions for wilting in agave, observed as negative values in the change of ZRM. These trends are similar to those shown in studies where projections of climate change and its effect on crops are made (Masutomi *et al.*, 2009) or pathogens such as *F. oxysporum* (Tantaoui *et al.*, 1996; Ferrocino *et al.*, 2014; Shabani *et al.*, 2014).

In places where the severity of this phytosanitary problem for agave is clear, the risk by wilting should be considered as a factor of reduction of areas for the production of raw material for the tequila industry. It is also necessary to use future scenarios of climate change to project as it could be the expected trend in risk areas by fusarium of DOT to produce agave tequila.

Conclusions

The relationship between risk areas and monitoring of agave in 1997-1998 with the bioclimatic index of rolled leaves rate turn with a correlation of 0.37 with highly significant difference ($p > 0.01$). The age of agave has a close link with THE and risk areas by wilting.

Risk areas by wilt was also correlated with the bioclimatic index leaf emergence rate (TEH) with a correlation of 0.38 and highly significant ($p > 0.01$), using agave monitoring during the period 2008-2009.

Las zonas de riesgo por marchitez también fue correlacionada con el índice bioclimático tasa de Emergencia de hojas (TEH) con una correlación de 0.38 y alta significancia ($p > 0.01$), utilizando el monitoreo de agave durante el periodo 2008-2009.

Se muestra evidencia del efecto del cambio climático sobre las zonas de riesgo por marchitez en Jalisco. Se encontraron dos tendencias, una orientada hacia la reducción del riesgo por fusarium para el agave tequilero en 26.2% del área, pero otra que acentúa el riesgo por fusarium en más de 23.3% de la superficie de Jalisco. Este cambio se fundamentó en la relación empírica de la tasa de hojas enrolladas y la tasa de emergencia de Hojas para el año 1997 y 2008, donde se utilizaron como indicadores de la asociación entre la marchitez del agave en tres zonas de riesgo y la edad del agave tequilero.

Es necesario utilizar escenarios de cambio climático para proyectar como podría ser la tendencia futura en las zonas de riesgo por fusarium en la DOT para producir agave tequilero.

Literatura citada

- Carrillo, L. 2003. Los hongos de los alimentos y forrajes. <http://www.unsa.edu.ar/matbib/hongos/htextocubierta.pdf>.
- CRT (Consejo Regulador del Tequila). 2010. Actualización de la base de datos y diagnóstico fitosanitario *Agave tequilana* Weber Var. Azul. Comité Técnico Agronómico. Sub-comité de Fitosanidad. Tomado de: <https://www.crt.org.mx/images/documentos/inventarioagave2010b.pdf>.
- CRT (Consejo Regulador del Tequila). 2015. Información estadística. <https://www.crt.org.mx/EstadisticasCRTweb/>.
- DeVay, J. E.; Gutierrez, A. P.; Pullman, G. S.; Wakeman, R. J.; Garber, R. H.; Jeffers, D. P.; Smith, S. N.; Goodell, P. B.; and Roberts, P. A. 1997. Inoculum densities of *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum* and *Meloidogyne incognita* in relation to the development of *Fusarium* wilt and the phenology of cotton plants (*Gossypium hirsutum*). *Phytopathology* 87:341-346.
- Ferrocino, I.; Chitarra, W.; Pugliese, M.; Gilardi, G.; Gullino, M. L.; Garibaldi, A. 2013. Effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on disease severity of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae* on lettuce plants. *Appl. Soil Ecol.* 72:1-6.
- Flood, J. 2006. A review of *Fusarium* wilt of oil palm caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *elaedis*. *Phytopathology* 96:660-662.
- Flores-López, H. E.; A. A. Chávez-Durán; R. Ortega A.; J. A. Ruíz Corral; C. De La Mora- Orozco; Ramírez, O. G. y Martínez, D. T. E. 2014. Análisis de la cadena agroalimentaria del arroz (*Oryza sativa* L.) en colima, con énfasis en el sistema de producción y potencial productivo. Campo experimental Centro-Altos de Jalisco, México. Libro técnico Núm. 5151 p.
- Evidence of the effect of climate change on risk areas by wilt in Jalisco is shown. Two tendencies were found, one aimed to reduction of risk by *Fusarium* for agave tequila in 26.2% of the area, but another that increases the risk by *Fusarium* in over 23.3% of the surface from Jalisco. This change was based on the empirical relationship of the rolled leaves rate and leaf emergence rate for 1997 and 2008, which were used as indicators of the association between agave wilt in three risk zones and age of agave tequila.
- It is necessary to use climate change scenarios to project as it could be the future the trend in risk areas by *Fusarium* in the DOT to produce agave tequila.

End of the English version



- Flores, L. H. E.; Ireta, J. M.; Pérez, D. J. F. F.; Ruíz, C. J. A.; Álvarez, M. C. y Byerly, K. F. M. 2009. Identificación de zonas de riesgo fitopatológico y opciones de prevención y/o control en el *Agave tequilana* weber variedad azul en Jalisco. Informe de investigación. INIFAP. CIRPAC. CECEAJAL. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. 34 p.
- Flores, L. H. E. 2000. Análisis agroecológico del *Agave tequilana* weber var. Azul con énfasis en problemas fitosanitarios. Informe de investigación. INIFAP-CIRPAC-CEAJAL. 161 p.
- Flores, L. H. E. 1994. Análisis agroclimático del noreste de Jalisco, México, para el manejo en la producción de maíz (*Zea mays* L.) de temporal. Tesis maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados. Programa de Agrometeorología. Montecillo, Estado de México. 155 p.
- Fravel, D. R.; Stosz, S. K.; and Larkin, R. P. 1996. Effect of temperature, soil type, and matric potential on proliferation and survival of *Fusarium oxysporum* f. sp. *erythroxyli* from *Erythroxylum coca*. *Phytopathology*. 86(3):236-240.
- Goldberg, N. P. 2006. *Fusarium* leaf spot and crown and root rot. Cooperative extension service. College of agriculture and home economics. O & T Guide TD-10. October. Las Cruces, NM. 2 p.
- Grulke, N. E. 2011. The nexus of host an pathogen phenology: understanding the disease triangle with climate change. *New physiologist*. 189:8-11.
- Heesterbeek, J. A. P. and Zadoks, J. C. 1987. Modelling pandemics of quarantine pests and diseases: problems and perspectives. *Crop Protection*. 6:211-221.
- Katan, J. 1989. Soil temperature interactions with the biotic components of vascular wilt diseases. *In: Vascular wilt diseases of plants. Basic studies and control*. Tjamos, E. C. and Beckman, C. H.. Springer-Verlag. Berlin, Germany. 353-366 pp.
- Kranz, J. and Hau, B. 1980. Systems analysis in epidemiology. *Annual review of phytopathology*. 18:67-83.
- Lacey, J. 1989. Pre- and post-harvest ecology of fungi causing spoilage of foods and other stored products. *Journal of Applied Bacteriol. Symp. Suppl.* ILS-25s.

- Landa, B. B.; Navas-Cortés, J. A.; Hervás, A. and Jiménez-Díaz, R. M. 2001. Influence of temperature and inoculum density of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* on suppression of *Fusarium* wilt of chickpea by rhizosphere bacteria. *Phytopathology*. 91:807-816.
- Landa, B. B.; Navas-Cortés, J. A.; Jiménez-Gasco, M. M.; Katan, J.; Retig, B. and Jiménez, D. R. M. 2006. Temperature response of chickpea cultivars to races of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*, causal agent of *Fusarium* wilt. *Plant Disease*. 90:365-374.
- Larkin, R. P. and Fravel, D. R. 2002. Effects of varying environmental conditions on biological control of *Fusarium* wilt of tomato by nonpathogenic *Fusarium* spp. *Phytopathology*. 92:1160-1166.
- Manici, L. M.; Bregaglio, S.; Fumagalli, D. and Donatelli, M. 2014. Modelling soil borne fungal pathogens of arable crops under climate change. *Int. J. Biom.*
- Marin, S.; Sanchis, V. and Magan, N. 1995. Water activity, temperature, and pH effects on growth of *Fusarium moniliforme* and *Fusarium proliferatum* isolates from maize. *Can. J. Microbiol.* 41:1063-1070.
- Masutomi, Y.; Takahashi, K.; Harasawa, H. and Matsuoka, Y. 2009. Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models. *Agric. Ecosys. Environ.* 131:281-291.
- Medina, G. G. y Ruiz, C. J. A. 1992. Sistema de información para caracterizaciones agroclimáticas versión 2.0. Desplegable Informativo núm. 1. SARH. INIFAP. Campo Experimental Zacatecas. 72 p.
- Nelson, P. E. 1981. Life cycle and epidemiology of *Fusarium oxysporum*. In: fungal wilt diseases of plants. Mace, M. E.; Bell, A. A. and Beckman, C. H. (Eds.). Academic Press Inc. New York, USA.
- Ocamb, C. M. and Juzwik, J. 1995. *Fusarium* species associated with rhizosphere soil and diseased roots of eastern white pine seedling and associated nursery soil. *Can. J. Plant Pathol.* 17:325-330.
- Ploetz, R. C. 2006. *Fusarium*-induced diseases of tropical, perennial crops. *Phytopathology* 96:648-652.
- Ramírez, M. L.; Chulze, S. y Magan, N. 2004. Impact of environmental factors and fungicides on growth and deoxynivalenol production by *Fusarium graminearum* isolates from Argentinian wheat. *Crop Protection*. 23:117-125.
- Rubio C. R. 2007. Enfermedades del cultivo de agave. In: Pérez-Domínguez, J. F. y del Real Laborde, J. I. (Eds.). Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de *Agave tequilana* Weber en la zona de denominación de origen del tequila. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. Libro técnico Núm. 4. 169-195 pp.
- SIAP-SAGARPA (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2015. Estadísticas de producción. <http://www.siap.gob.mx/resumen-nacional-por-estado/>.
- Shabani, F.; Kumar, L. and Esmaeili, A. 2014. Future distributions of *Fusarium oxysporum* f. spp. in European, Middle Eastern and North African agricultural regions under climate change. *Agric. Ecosys. Environ.* 197:96-105.
- Shaw, M. W. and Osborne, T. M. 2011. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change. *Plant Pathology*. 60:31-43.
- Smith, I. M.; Dunez, J.; Phillips, D. H.; Lellott, R. A. and Archer, S. A. 1988. European handbook of plant diseases. Aseomycetes II: Clavicipitales. Hypocreales. Blackwell Scientific Publications. Boston, Massachusetts, USA. 274-306 pp.
- Tantaoui, A.; Ouinen, M.; Geiger, J.-P. and Fernandez, D. 1996. Characterization of a single clonal lineage of *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* causing bayoud disease of date palm in Morocco. *Phytopathology*. 86:787-792.
- Timmer, L. W. 1982. Host range and host colonization, temperature effects, and dispersal of *Fusarium oxysporum* f. sp. *citri*. *Phytopathology*. 72(6):698-702.
- Villarreal F., E. 2000. Guía para la aplicación del modelo productor-experimentador. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Coordinación General de Extensiónismo y Desarrollo Tecnológico. México, D. F. 89 p.
- Zadoks, J. C. and Schien, R.D. 1980. Epidemiology and plant-disease management, the known and the needed. In: comparativa epidemiology: a tool for better disease management. Palty, J. y Kranz, J. (Eds.). Centre for Agricultura Publishing. Wageningen, Holanda. 95 p.