

ANÁLISIS DE LA PROBABILIDAD DE DISPERSIÓN DE POLEN DE MAÍZ GENÉTICAMENTE MODIFICADO USANDO EL MODELO HYSPLIT

ANALYSIS OF DISPERSAL PROBABILITY OF GENETICALLY MODIFIED MAIZE POLLEN USING THE HYSPLIT MODEL

Angélica Robayo-Avedaño*, María G. Galindo-Mendoza

Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Coordinación Para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y Tecnología. Avenida Sierra Leona No. 550, Colonia Lomas, Segunda Sección. 78210. San Luis Potosí, México. (angelica.robayo@uaslp.mx)

RESUMEN

El desarrollo de Organismos Genéticamente Modificados (OGM) es una alternativa eficiente para el control de plagas en el sector agrícola, pero su aplicación en cultivos de maíz (*Zea mays* L.) ha generado preocupación por proteger la riqueza genética de parientes silvestres. Por ello, las evaluaciones en este tipo de cultivos se orientan a controlar probables dispersiones de polen de maíz Genéticamente Modificado (GM) hacia parientes silvestres. Aunque los valores de distancias de aislamiento se consideran como parámetros para establecer criterios de bioseguridad, es necesario respaldar más las distancias adoptadas. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue analizar de forma espacial la dispersión de partículas de polen de maíz GM. Para ello, se utilizaron datos históricos de liberaciones autorizadas de maíces GM para el año 2010 en el estado de Sinaloa (México), y datos de floración, velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa del aire. Debido a la factibilidad para simular dispersión y depósito de partículas atmosféricas en grandes distancias y la alta resolución de los datos meteorológicos, se usó el modelo HYSPLIT para el desarrollo de simulaciones progresivas de dispersión de polen, considerando un tiempo de viabilidad de las partículas de 2 h. El análisis de los resultados mostró una tendencia de las dispersiones en direcciones sur-este y sur-oeste, con probables distancias de recorrido de 2.2 a 20 km en la mayor concentración de partículas correspondiente a $1.0 \text{ e}^{-13} \text{ mg m}^{-3}$, probando que éstas pueden recorrer distancias mayores a 300 y 500 m asumidos como medidas de bioseguridad.

Palabras clave: maíz, modelo HYSPLIT, polinización.

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: febrero, 2014. Aprobado: julio, 2014.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 48: 511-523. 2014.

ABSTRACT

The development of Genetically Modified Organisms (GMOs) is an efficient alternative for plague control in the agricultural sector, but their application in maize crops (*Zea mays* L.) has generated preoccupation regarding the protection of the genetic wealth of wild relatives. Therefore, evaluations of these types of crops are directed at controlling probable pollen dispersals of Genetically Modified (GM) maize towards wild relatives. Although the values for isolation distances are considered as parameters to establish biosafety criteria, it is necessary to further support the distances adopted. Thus, the objective of this study was to analyze spatially the dispersal of GM maize pollen particles. For this purpose, historical data of authorized releases of GM maize for the year 2010 in the state of Sinaloa (México) were used, as well as data regarding flowering, wind speed and direction, temperature and relative humidity in the air. Due to the feasibility of simulating the dispersal and deposition of atmospheric particles in long distances and the high resolution of meteorological data, the HYSPLIT model was used to develop progressive simulations of pollen dispersal, taking into account a time for viability of the particles of 2 h. The analysis of results showed a tendency in dispersals in the south-east and south-west directions, with probable travelling distances of 2.2 to 20 km with the highest concentration of particles that corresponded to $1.0 \text{ e}^{-13} \text{ mg m}^{-3}$, proving that these can travel distances greater than 300 and 500 m, which are assumed as biosafety measures.

Key word: maize, HYSPLIT model, pollination.

INTRODUCTION

By the year 2050 the world population will be nine billion people, which entails having the capacity to satisfy the food demand (Pushpangadan *et al.*, 2012). Genetically Modified

INTRODUCCIÓN

Para el año 2050 la población mundial será nueve billones de personas lo cual implica tener capacidad para satisfacer la demanda de alimentos (Pushpangadan *et al.*, 2012). Los Organismos Genéticamente Modificados (OGM) son una alternativa para mejorar la productividad de los cultivos, induciendo la resistencia a plagas (Ashraf y Akram, 2009; Wang *et al.*, 2010) y, además, aumentando el contenido de proteínas, carbohidratos, lípidos, vitaminas y micronutrientes (Ahmad *et al.*, 2012). Sin embargo, su aplicación requiere emplear medidas de bioseguridad entre las cuales se incluyen la protección al ambiente y a la biodiversidad (DOF, 2005).

El maíz ocupa el tercer lugar de los cultivos genéticamente modificados adoptados en el mundo (Clive, 2012). México tiene el cuarto lugar internacional en producción de maíz, el cual forma parte de la dieta básica de la población mexicana y es una fuente de empleo para agricultores de pequeña escala (Hellin *et al.*, 2013). Además, debido a su riqueza en parientes silvestres del maíz, México es considerado centro de origen y diversidad al contar con un depósito único de recursos genéticos de este cultivo (DOF, 2012; Wolt, 2009).

Con el fin de preservar la calidad genética de especies nativas de maíz, se han establecido medidas de bioseguridad en el desarrollo de OGM para controlar la dispersión de flujo polínico a variedades no objetivo (Wolt, 2009). El polen de maíz se dispersa a través del viento (Messeguer, 2003) y su transferencia es afectada por aspectos relacionados con la sincronía en tiempos de floración, distancia de aislamiento y condiciones climáticas (Baltazar *et al.*, 2005; Bannert y Stamp; 2007).

El polen se libera desde las anteras en la parte superior de la planta, su diámetro oscila de 90 a 100 μm y su peso es de aproximadamente 0.25 μg (Aylor *et al.*, 2003; Fonseca *et al.*, 2003). Las partículas de polen pueden alcanzar alturas mayores a 100 m, límite en el cual la viabilidad es 20 %, pero al aumentar la altura la viabilidad de las partículas decrece (Viner y Arritt, 2010). Además, la viabilidad del polen depende de factores relacionados con su contenido de agua y condiciones climáticas (Fonseca y Westgate, 2005; Viner y Arritt, 2010). A temperaturas elevadas y humedades relativas (HR) bajas se reduce la viabilidad (Luna

Organisms (GMOs) are an alternative to improve the productivity of crops, inducing resistance to plagues (Ashraf and Akram, 2009; Wang *et al.*, 2010) and, also, increasing the content of proteins, carbohydrates, lipids, vitamins and micronutrients (Ahmad *et al.*, 2012). However, their application requires using biosafety measures among which the protection of the environment and biodiversity are included (DOF, 2005).

Maize occupies the third place in genetically modified crops adopted in the world (Clive, 2012). México has the fourth place internationally in maize production, which is part of the basic diet of the Mexican population and a source of employment for small-scale farmers (Hellin *et al.*, 2013). In addition, due to its wealth in wild relatives of maize, México is considered center of origin and diversity, since it has a unique repository of genetic resources of this crop (DOF, 2012; Wolt, 2009).

With the goal of preserving the genetic quality of native maize species, biosafety measures have been established in the development of GMOs to control the pollen flow dispersal to non-target varieties (Wolt, 2009). Maize pollen is dispersed by wind (Messeguer, 2003) and its transference is affected by aspects related to the synchronicity of flowering periods, the isolation distance and climate conditions (Baltazar *et al.*, 2005; Bannert and Stamp; 2007).

Pollen is liberated from the anthers on the superior part of the plant, its diameter ranges from 90 to 100 μm and its weight is approximately 0.25 μg (Aylor *et al.*, 2003; Fonseca *et al.*, 2003). The pollen particles can reach heights higher than 100 m, limit at which the viability is 20 %, yet as the height increases the viability of the particles decreases (Viner and Arritt, 2010). Also, pollen viability depends on factors related to its water content and climate conditions (Fonseca and Westgate, 2005; Viner and Arritt, 2010). At high temperatures and low relative humidity (RH), viability decreases (Luna *et al.*, 2001; Aylor *et al.*, 2003; Arritt *et al.*, 2007) and with 20.7 °C and 75.7 % RH the viability is 50 % during the first 44 min of the particle trajectory (Fonseca and Westgate, 2005). The pollen grains can be totally dehydrated at between 1 and 4 h (Aylor *et al.*, 2003) and in drought environments their viability decreases 20 % in 1 h and 100 % in 2 h of trajectory (Luna *et al.*, 2001).

et al., 2001; Aylor *et al.*, 2003; Arritt *et al.*, 2007) y con 20.7 °C y 75.7 % HR la viabilidad es 50 % en los primeros 44 min de trayecto de la partícula (Fonseca y Westgate, 2005). Los granos de polen pueden deshidratarse totalmente entre 1 a 4 h (Aylor *et al.*, 2003) y en ambientes de sequía su viabilidad decrece 20 % en 1 h y 100 % en 2 h de trayecto (Luna *et al.*, 2001).

La relación de viabilidad de la partícula y el potencial de cruce con otras variedades en diferentes distancias de aislamiento fue estudiado por Ricoch *et al.* (2009), Aheto *et al.* (2011) y Marceau *et al.* (2012) y hay diferentes tasas de polinización cruzada (Luna *et al.*, 2001; Goggi *et al.*, 2006; Bannert y Stamp, 2007). Según Goggi *et al.* (2006), en distancias de 100 m hay un cruce potencial entre variedades de 0.05 % y en 250 m es 0.03 %, mientras que Bannert y Stamp (2007) reportan 0.02 % de cruce en distancias de 50 a 4500 m.

En México, Luna *et al.* (2001) reportan que no ocurre polinización en distancias mayores a 200 m. Con base en ello se establecieron dos distancias de aislamiento para liberaciones de OGM en cultivos de maíz en el país: 200 a 300 m desde el límite de maíz GM a cultivos híbridos para liberaciones en fase experimental, y 500 m para liberaciones en etapa piloto o pre-comercial. Además, un aislamiento temporal de 21 d si hay presencia de parientes silvestres o razas nativas en zonas circundantes (Luna *et al.*, 2001; SENASICA, 2013a, b).

Además de los estudios en campo se usan modelos de simulación para analizar espacialmente la dispersión probable de polen en condiciones de vegetación heterogénea (Bunting y Middleton, 2005). Otros modelos describen estadísticamente datos de vegetación en mapas o validan modelos teóricos o de paisaje usando datos empíricos (Eklöf *et al.*, 2004; Fyfe, 2006). Sin embargo, cada modelo tiene limitaciones, desde el manejo de variables hasta el costo del modelo (Bunting y Middleton, 2005).

HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), desarrollado por Air Resources Laboratory (ARL) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Draxler y Hess, 1997), es un sistema de modelado de trayectorias, dispersión y depósito de partículas. Considera dos tipos de análisis, el regresivo para determinar la fuente de origen del contaminante, y el análisis progresivo para conocer los sitios a donde llegará

The viability relationship of the particle and the potential for crosses with other varieties at different isolation distances was studied by Ricoch *et al.* (2009), Aheto *et al.* (2011) and Marceau *et al.* (2012), and there are different rates of crossed pollination (Luna *et al.*, 2001; Goggi *et al.*, 2006; Bannert and Stamp, 2007). According to Goggi *et al.* (2006), at distances of 100 m there is a potential cross between varieties of 0.05 % and at 250 m the level is 0.03 %, while Bannert and Stamp (2007) report 0.02 % of crossing at distances of 50 to 4500 m.

In México, Luna *et al.* (2001) report that there is no pollination at distances greater than 200 m. Based on this, two isolation distances were established for the release of GMOs in maize crops of the country: 200 to 300 m from the limit of GM maize to hybrid crops for releases in the experimental phase, and 500 m for releases in the pilot or pre-commercial stage. Also, a temporary isolation of 21 d in the case of presence of wild relatives or native races in surrounding areas (Luna *et al.*, 2001; SENASICA, 2013a, b).

In addition to field studies, simulation models are used to analyze spatially the probable dispersal of pollen under conditions of heterogeneous vegetation (Bunting and Middleton, 2005). Other models statistically describe the vegetation data in maps or validate theoretical or landscape models using empirical data (Eklöf *et al.*, 2004; Fyfe, 2006). However, each model has limitations, from variable management to the cost of the model (Bunting and Middleton, 2005).

HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), developed by the Air Resources Laboratory (ARL) of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Draxler and Hess, 1997), is a modelling system for particle trajectories, dispersal and deposit. It considers two types of analysis, the regressive to determine the source of origin of the pollutant, and the progressive analysis to explore the places where the particle evaluated will reach (Wen *et al.*, 2012; Sunnu *et al.*, 2013). Initially the model was used to measure the level of atmospheric pollution (Wang *et al.*, 2010; 2011; Chen *et al.*, 2012), although it is also applied in studies to measure pollen particle concentration (Hernández-Ceballos *et al.*, 2011; Efstathiou *et al.*, 2011).

la partícula evaluada (Wen *et al.*, 2012; Sunnu *et al.*, 2013). Inicialmente el modelo se usó para medir el nivel de contaminación atmosférica (Wang *et al.*, 2010; 2011; Chen *et al.*, 2012), pero también se aplica en estudios de medición de concentración de partículas de polen (Hernández-Ceballos *et al.*, 2011; Efstathiou *et al.*, 2011).

El empleo de alternativas para establecer medidas de bioseguridad es importante, por lo cual el modelo HYSPLIT servirá como herramienta en la toma de decisiones para el establecimiento de distancias de aislamiento entre un cultivo GM y uno convencional. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue usar el modelo HYSPLIT en la estimación de escenarios probables de dispersión de polen desde cultivos GM hacia convencionales. Para ello, se realizó un estudio de caso en el estado de Sinaloa, México, con base en datos históricos de cultivos de maíz GM para el año 2010. Para localizar estos cultivos se aplicaron Sistemas de Información Geográfica (SIG) y esta ubicación se usó como referencia para desarrollar simulaciones progresivas, con el fin de conocer la dispersión probable desde el origen del cultivo hacia puntos probables de depósito y concentración de partículas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó en el estado de Sinaloa, que ocupa el primer lugar nacional en producción de maíz en grano y cuya siembra es en dos ciclos, pero la plantación de otoño (de noviembre a mayo) bajo riego es la más representativa en la región (INEGI, 2013). En otoño de 2010, en Sinaloa, los valores promedio de temperatura, HR y velocidad del viento fueron 20 °C, 70 % y 6 km h⁻¹, según el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD).

Sistemas de Información Geográfica (SIG)

En este estudio se localizaron nueve polígonos de liberación de maíz GM con características de tolerancia a herbicidas y resistencia a insectos, autorizados para el 2010, y la información se obtuvo en el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). Para la ubicación de los polígonos se utilizó ArcMap 9.3, aplicación de ArcGis 9 desarrollada por ESRI (Environmental Systems Research Institute) en EE. UU.

The use of alternatives to establish biosafety measures is important, so that the HYSPLIT model will serve as a tool in decision-making for the establishment of isolation distances between a GM crop and a conventional one. Therefore, the objective of this study was to use the HYSPLIT model to estimate probable scenarios of pollen dispersal from GM crops towards conventional ones. For that purpose, a study case was carried out in the state of Sinaloa, México, based on historical data on GM maize crops for the year 2010. To locate these crops, Geographical Information Systems (GIS) were applied, and the location was used as reference to develop progressive simulations, with the aim of understanding the probable dispersal from the origin of the crop towards probable spots for particle deposit and concentration.

MATERIALS AND METHODS

Study site

The study was performed in the state of Sinaloa, which occupies the first place in grain maize production in the country, with sowing in two cycles, although the autumn planting (November to May) under irrigation is the most representative for the region (INEGI, 2013). In the autumn of 2010, in Sinaloa, the average values for temperature, RH and wind speed were 20 °C, 70 % and 6 km h⁻¹, according to the Center for Research in Food and Development (Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, CIAD).

Geographical Information Systems (GIS)

In this study, nine GM maize release polygons were located, with characteristics of tolerance to herbicides and resistance to insects, authorized for 2010, and the information was obtained at the National Service for Food Health, Innocuousness and Quality (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, SENASICA). For the location of polygons, the ArcMap 9.3 software was used, ArcGis 9 application, developed by ESRI (Environmental Systems Research Institute) in USA.

To locate the zones of restricted dispersal for GM maize pollen, coordinates for localization of collection points for maize races were used, based on information by the National Commission for Knowledge and Use of Biodiversity (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO). Then, the program based on the maximum entropy method (Maxent) was applied, to understand the distribution of maize races in the

Para ubicar las zonas restringidas de dispersión de polen de maíz GM se usaron coordenadas de localización de puntos de recolección de razas de maíz con base en información de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Después se aplicó el programa basado en el método de máxima entropía (Maxent), para conocer la distribución de las razas de maíz en el estado, dado que el programa se aplica para determinar la ubicación geográfica de diversas especies con base en variables climáticas (Yang *et al.*, 2013).

Información meteorológica

Para este estudio se usaron bases de datos de estaciones de monitoreo del Centro de Investigación en Alimentos y Desarrollo (CIAD), del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en México y de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (National Centers for Environmental Prediction - NCEP). Las condiciones meteorológicas consideradas fueron velocidad y dirección del viento, temperatura y HR en el ambiente.

Las condiciones de dirección y velocidad del viento se calcularon para el periodo de floración comprendido entre el 20 de febrero y el 6 de marzo del 2010. Para conocer la tendencia de los vientos se localizaron las estaciones de monitoreo del CIAD más cercanas a los puntos de maíz GM y se elaboraron rosas de los vientos para cada estación, durante el ciclo de floración. Para ello se usó el programa WRPLOT (Wind Rose Plots for Meteorological Data) desarrollado por Lakes Environmental.

Según el tiempo probable de viabilidad de la partícula de polen se establecieron cuatro categorías de temperatura y HR (Fonseca y Westgate, 2005): Muy Favorable (MF), Favorable (F), Poco Favorable (PF) y Escaso (E). La categoría MF fue para horas con temperaturas de 20 a 23 °C y HR de 68 a 80 %; F para horas con 23.1 a 26.1 °C y HR de 55 a 67 %; PF para horas con 26.2 a 29.2 °C y HR de 41 a 54 %; E para horas con 20 a 29.2 °C y HR de 29 a 41 %.

Los datos históricos de las estaciones de monitoreo se usaron para seleccionar los días y horas con mayor probabilidad de condiciones más favorables de temperatura y HR. Además, dado que el modelo HYSPLIT se ejecuta usando bases de datos meteorológicas de los NCEP, los datos históricos del GDAS (Global Data Assimilation System) se seleccionaron porque este modelo atmosférico proporciona perfiles de altitud de las principales variables de estado de la atmósfera, como temperatura y humedad (Andrei y Chen, 2009). Después, la información proporcionada por el SMN se usó como referencia para el desarrollo de mapas diarios de temperatura y de HR en el estado, con el fin de establecer capas de comparación para un análisis final de criterios.

state, since the program is applied to determine the geographical location of various species based on climate variables (Yang *et al.*, 2013).

Meteorological information

For this study databases from monitoring stations were used, for the Center for Research in Food and Development (CIAD), the National Meteorological Service (Servicio Meteorológico Nacional, SMN) in México and the National Centers for Environmental Prediction (NCEP). The meteorological conditions taken into account were wind speed and direction, temperature and relative humidity in the environment.

The conditions of wind direction and speed were calculated for the flowering period between February 20 and March 6 in 2010. In order to know the tendency of the winds, the CIAD's monitoring stations closest to the GM maize points were located, and compass roses were made for each station, during the flowering cycle. For this purpose, the WRPLOT software (Wind Rose Plots for Meteorological Data) developed by Lakes Environmental was used.

According to the probable time for viability of the pollen particle, four categories of temperature and RH were established (Fonseca and Westgate, 2005): Very Favorable (MF), Favorable (F), Slightly Favorable (PF) and Scarce (E). The MF category was for hours with temperatures from 20 to 23 °C and RH from 68 to 80 %; F for hours with 23.1 to 26.1 °C and RH from 55 to 67 %; PF for hours with 26.2 to 29.2 °C and RH from 41 to 54 %; E for hours with 20 to 29.2 °C and RH from 29 to 41 %.

Historical data from the monitoring stations were used to select the days and hours with highest probability of more favorable temperature and RH conditions. Also, given that the HYSPLIT model is executed using meteorological databases from the NCEPs, historical data from the GDAS (Global Data Assimilation System) were selected, because this atmospheric model provides altitude profiles of the principal atmospheric state variables, such as temperature and humidity (Andrei and Chen, 2009). Afterwards, the information provided by the SMN was used as reference for the development of daily temperature and RH maps in the state, with the aim of establishing comparison layers for a final criteria analysis.

Application of the HYSPLIT model

The HYSPLIT model calculates the trajectories and dispersal of air parcels through the combination between Eulerian (fixed with regards to the Earth) and Lagrangian (which follow the movement of the Earth) coordinates (Pasken and

Aplicación del modelo HYSPLIT

El modelo HYSPLIT calcula las trayectorias y dispersión de parcelas de aire mediante la combinación entre coordenadas Eulerianas (fijas respecto a la tierra) y Lagrangianas (que siguen el movimiento de la tierra) (Pasken y Pietrowicz, 2005; INECC, 2013). El enfoque de Lagrange se usa para cálculos de difusión y advección de partículas, mientras que las concentraciones son calculadas sobre una cuadrícula fija. La concentración de aire representa la masa de partículas en modelos en forma de nubes o modelos de partículas o una mezcla de ambos (Draxler y Hess, 1997; Pasken y Pietrowicz, 2005).

En este estudio se usó la simulación de dispersión progresiva con el modelo HYSPLIT, para determinar los sitios probables a donde pudo llegar el polen. Con base en el periodo de floración y a partir de las coordenadas de localización de parcelas de maíz GM, se desarrollaron simulaciones diarias durante las horas con las condiciones probables más favorables respecto a la viabilidad, tomando como parámetros la temperatura y HR del aire. Los datos de entrada en el modelo fueron el peso del polen de maíz, la altura y velocidad de depósito y el tiempo de viabilidad. De acuerdo con Fonseca *et al.* (2003), se usó un peso de polen de 0.25 µg; además se estableció una altura máxima de depósito de partícula de 100 m, una velocidad de depósito seca de 0.02 cm s⁻¹ y un tiempo probable de viabilidad de 2 h.

Conviene mencionar que en este estudio no se realiza una comparación de resultados con datos de campo, porque actualmente no hay información disponible; sin embargo, el modelo HYSPLIT se usa en estudios de análisis de dispersión de partículas, lo cual muestra su confiabilidad (Wang *et al.*, 2010; Efstathiou *et al.*, 2011). En este estudio, el HYSPLIT se usó como herramienta para la toma de decisiones en el establecimiento de distancias entre cultivos GM y convencionales.

Estructuración de mapas

Las horas con las condiciones MF de viabilidad de polen se tomaron como referencia para desarrollar interpolación en mapas de temperatura y HR por intervalos de horas. Las capas se superpusieron y se otorgó un peso a cada una, dando un valor mayor a la de distribución de razas de maíz, considerando la prioridad por verificar la existencia de parientes silvestres de maíz en el sitio. Esto permitió establecer zonas probables de riesgo alto, medio y bajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Localización de polígonos

Para obtener los datos de entrada de la simulación de partículas, se georreferenciaron los polígonos de

Pietrowicz, 2005; INECC, 2013). The Lagrangian approach is used for calculations of particle diffusion and advection, while the concentrations are calculated on a fixed grid. The air concentration represents the particle mass in models in the shape of clouds or particle models or a combination of both (Draxler and Hess, 1997; Pasken and Pietrowicz, 2005).

For this study the simulation of progressive dispersal was applied, using the HYSPLIT model, with the goal of determining the probable sites where pollen could have reached. Based on the flowering period and from the localization coordinates for GM maize plots, daily simulations were developed during the hours with the most favorable probable conditions with regard to the viability, taking as parameters the temperature and RH of the air. The entry data in the model were weight of maize pollen, height and speed of deposit, and viability time. Based on Fonseca *et al.* (2003), a pollen weight of 0.25 µg was used; in addition, a maximum height for particle deposit of 100 m was established, with dry deposit speed of 0.02 cm s⁻¹ and probable viability time of 2 h.

It should be mentioned that a comparison of results with field data was not performed in this study, because there is currently no information available; however, the HYSPLIT model is used in studies of particle dispersal analysis, showing its reliability (Wang *et al.*, 2010; Efstathiou *et al.*, 2011). In this study, the HYSPLIT was used as a decision-making tool to establish distances between GM and conventional crops.

Map structuring

The hours and MF conditions for pollen viability were taken as reference to develop interpolation in temperature and RH maps per hour intervals. The layers were superimposed and a weight was assigned to each, giving a higher value to the distribution of maize races, considering verifying the existence of wild maize relatives in the site as priority. This allowed establishing probable zones of high, medium and low risk.

RESULTS AND DISCUSSION

Polygon localization

To obtain the entry data for the particle simulation, the GM maize polygons were geo-referenced and the information provided by the CIAD meteorological stations closest to the GM maize was used. Based on the results, a marked tendency of winds in the northwest (NW) direction was observed, with speeds equal or higher than 11.1 m s⁻¹, followed by wind tendencies towards the southwest (SW) and northeast

maíz GM y se usó la información proporcionada por las estaciones meteorológicas del CIAD más cercanas a los puntos de maíz GM. Con base en los resultados, se observó una tendencia marcada de los vientos en direcciones noroeste (NO), con velocidades iguales o mayores de 11.1 m s^{-1} , seguida por tendencias de vientos en direcciones suroeste (SO) y noreste (NE) con velocidades entre 2.1 y mayores de 11.1 m s^{-1} . Además, los valores promedio diario de temperatura oscilaron alrededor de $19 \text{ }^\circ\text{C}$ con HR de 70% durante el período de floración del 20 de febrero al 6 de marzo para el 2010 (Figura 1).

El artículo 89 de la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM) prohíbe realizar actividades con OGM en las zonas núcleo de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) y sitios RAMSAR, establecidos en la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, excepto que dichas actividades se usen para fines de biorremediación (DOF, 2005). Al comparar la ubicación de ANP y sitios RAMSAR con la localización

(NE) directions with speeds between 2.1 and higher than 11.1 m s^{-1} . Also, the daily average temperature values fluctuated around $19 \text{ }^\circ\text{C}$ with RH of 70% during the flowering period between February 10 and March 6, 2010 (Figure 1).

Article 89 of the Law on Biosafety of Genetically Modified Organisms (Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados, LBOGM) prohibits performing activities with GMOs in nuclei zones of Protected Natural Areas (Áreas Naturales Protegidas, ANP) and RAMSAR sites, established within the Convention Relative to Wetlands of International Importance, except when such activities are used for the purpose of bioremediation (DOF, 2005). When comparing the location of ANP and RAMSAR sites with the localization of GM maize polygons on the maps, no interference with protected areas was found. The distances between these sites were 2 to 5 km, complying with regulation. However, it is worth evaluating whether these proximity distances are sufficient to control the

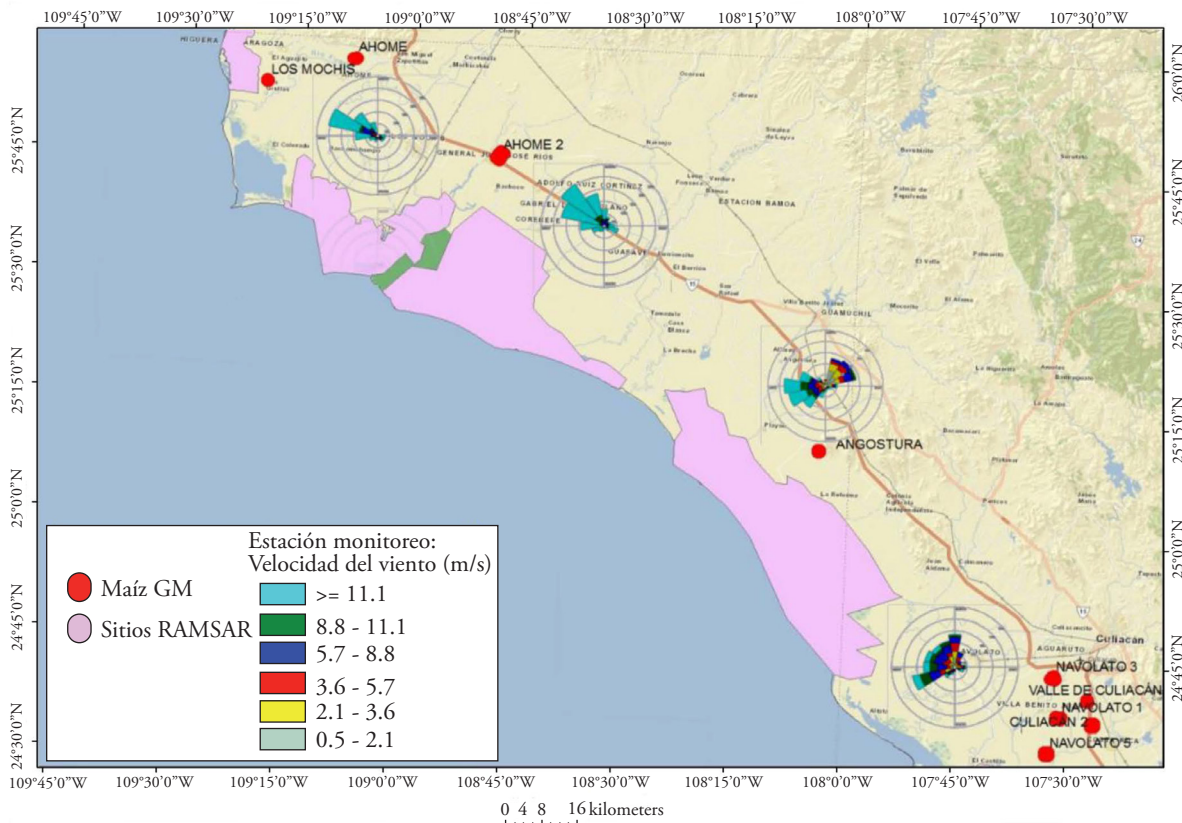


Figura 1. Localización de Maíz Genéticamente Modificado, Áreas Protegidas y condiciones de los vientos.
Figure 1. Localization of Genetically Modified Maize, Protected Areas and wind conditions.

de polígonos de maíz GM en los mapas, no se observó interferencia con áreas protegidas. Las distancias entre estos sitios fueron 2 a 5 km, cumpliendo con la regulación. Sin embargo, conviene valorar si estas distancias de proximidad son suficientes para controlar el desplazamiento probable de partículas de polen de maíz GM a zonas restringidas.

Condiciones meteorológicas y modelo HYSPLIT

Con base en la información meteorológica emitida por las estaciones del CIAD, se seleccionaron las horas y días cuando las condiciones probables de viabilidad estaban en el nivel Muy Favorable, considerando éste como el valor óptimo. Este criterio se cumplió el 20 y el 27 de febrero, y el 1, 3, 4, 5 y 6 de marzo de 2010, entre las 08:30 h y las 13:15 h (Cuadro 1).

El tiempo de viabilidad en cada intervalo horario, de acuerdo con las condiciones climáticas óptimas, osciló entre 15 min y 3 h con 30 min, lo cual es similar con los intervalos de tiempo del estudio de Fonseca y Westgate (2005). Para desarrollar las simulaciones de dispersión en el modelo HYSPLIT se estableció un tiempo de recorrido de 2 h, considerando que la partícula pudiera perder su contenido total de humedad en dicho tiempo, de acuerdo con Luna *et al.* (2001).

Con base en la periodicidad emitida, se realizaron las simulaciones a partir de los polígonos de maíz GM cercanos a cada estación y los resultados mostraron cuatro intervalos de concentración en cada nube de partículas de polen. Para Jarosz *et al.* (2003), la concentración de partículas de polen disminuye a medida que aumenta la distancia recorrida, lo cual coincide con el presente estudio porque al simular la dispersión de polen, el primer intervalo correspondiente a la más alta concentración fue $1.0 \text{ e}^{-13} \text{ mg m}^{-3}$, en segundo lugar $1.0 \text{ e}^{-14} \text{ mg m}^{-3}$, tercero $1.0 \text{ e}^{-15} \text{ mg m}^{-3}$ y cuarto $1.0 \text{ e}^{-16} \text{ mg m}^{-3}$.

Comparación de variables

El cruce de capas de mapas de temperatura, HR y variedades nativas de maíz permitió obtener tres niveles de riesgo: alto, medio y bajo. Estos niveles se relacionan con la probabilidad de que en las zonas marcadas pudieran ocurrir las condiciones climáticas para que el polen que allí se trasportara mantuviera su

probable movement of GM maize pollen particles to restricted zones.

Meteorological conditions and the HYSPLIT model

Based on the meteorological information issued by the CIAD stations, the hours and days were selected when the probable viability conditions were at the Very Favorable level, considering these as the optimal value. This criterion was fulfilled on February 20 and 27, and March 1, 3, 4, 5, and 6, 2010, between 08:30 h and 13:15 h (Table 1).

The viability time in each time interval, according to the optimal climate conditions, ranged between 15 min and 3 h with 30 min, which is similar with the time intervals in the Fonseca and Westgate (2005) study. To develop the dispersal simulations in the HYSPLIT model, a travelling time of 2 h was established, considering that the particle could lose its total moisture content during that time, according to Luna *et al.* (2001).

Based on the regularity sent out, the simulations were performed from the GM maize polygons close to each station, and the results showed four concentration intervals in each pollen particle cloud. To Jarosz *et al.* (2003), the pollen particle concentration decreases as the distance travelled increases, which coincides with our study because

Cuadro 1. Viabilidad probable en relación a condiciones óptimas de temperatura y humedad relativa.

Table 1. Probable viability with regard to optimal conditions of temperature and relative humidity.

Estación CIAD	Fecha	Intervalo horario de viabilidad probable
Aguaruto	20-02-2010	08:30-09:15
Agronomía	27-02-2010	09:15-09:30
Macapul	27-02-2010	09:15-09:45
Agronomía	01-03-2010	09:15-10:15
Macapul	03-03-2010	09:15-09:45
Macapul	04-03-2010	09:15-10:15
Aguaruto	05-03-2010	09:30-10:30
Agronomía	05-03-2010	09:30-10:45
Agronomía	06-03-2010	09:15-10:45
Macapul	06-03-2010	10:15-12:30
Guayabo	06-03-2010	10:30-12:45
J. J. Ríos	06-03-2010	10:45-13:15

viabilidad y, además, que existiera presencia de maíz nativo y riesgo probable de polinización.

El análisis de los días de viabilidad probable, en las simulaciones durante las 2 h de recorrido, mostró distancias mayores a 2.2 km. Este resultado es similar al de Viner y Arritt (2010), quienes calcularon dispersión de polen en distancias alrededor de 5 km en condiciones constantes de temperatura y HR.

Para el 20 de febrero, como resultado de la simulación, la dispersión tuvo tendencia hacia el SO en distancias de 2.2 a 4.6 km en el intervalo de mayor concentración y de 20 a 24.8 km en intervalos de menor concentración. La trayectoria fue en un nivel medio de riesgo, esto es, aunque pudieran darse las condiciones climáticas favorables para mantener una viabilidad, la zona hacia donde se dirigió la partícula no muestra una superficie alta de variedades nativas.

Para el 27 de febrero la dispersión tuvo tendencia hacia el SE en el norte del estado y se mantuvo dentro del nivel bajo de riesgo alcanzando una distancia máxima de 39 km con una baja concentración de partículas ($1.0 \text{ e}^{-16} \text{ mg m}^{-3}$). Las demás dispersiones obtenidas con el modelo mostraron una tendencia hacia el SO, iniciando en un nivel medio y terminando su trayectoria en un nivel bajo de riesgo. La concentración mayor de partículas fue en distancias aproximadas a 14 km y una concentración baja en distancias de 29 km. La zona probable a donde se dispersó el polen era baja en densidad de maíz nativo. Este factor aunado a que el tiempo de viabilidad de las partículas osciló entre los primeros 15 y 30 min de trayecto, ocasiona una pérdida probable de viabilidad para el resto del trayecto (Figura 2).

En las simulaciones realizadas para el 1 y 3 de marzo de 2010, las dispersiones tuvieron tendencias de SE y SO, respectivamente, y ambas en un nivel medio de riesgo. Su viabilidad se mantuvo desde 45 hasta 60 min, es decir la mitad del trayecto, y las mayores distancias de dispersión probable para el trayecto total fueron 16.4 km para el día 1 y 33 km para el día 3, pero la zona donde se desplazaron las partículas tuvo una baja área con maíz nativo. Para el 4 y 5 de marzo las respectivas tendencias fueron SE y SO, y el tiempo de viabilidad de las partículas fue superior a 60 min, pero las dispersiones fueron en una zona media de riesgo, alcanzando distancias de 13 a 18 km para el trayecto total. Al considerar el tiempo de viabilidad así como las características de la zona donde se movió la partícula, se puede concluir que durante

when simulating the pollen dispersal, the first interval corresponds to the highest concentration which was $1.0 \text{ e}^{-13} \text{ mg m}^{-3}$, $1.0 \text{ e}^{-14} \text{ mg m}^{-3}$ in second place, $1.0 \text{ e}^{-15} \text{ mg m}^{-3}$ third and $1.0 \text{ e}^{-16} \text{ mg m}^{-3}$ fourth.

Variable comparison

The crossing of layers of temperature, RH and native maize varieties' maps allowed obtaining three levels of risk: high, medium and low. These levels are related to the probability that in marked zones the climate conditions for pollen transported there to maintain its viability could occur and, in addition, the presence of native maize and probable risk for pollination could exist.

The analysis of probable viability days, in the simulations during the 2 h of travel, showed distances greater than 2.2 km. This result is similar to that from Viner and Arritt (2010), who calculated pollen dispersal in distances around 5 km under conditions of constant temperature and RH.

By February 20, as a result of the simulation, the dispersal had a tendency towards the SW in distances of 2.2 and 4.6 km within the interval of highest concentration and of 20 to 24.8 km in the intervals of lower concentration. The trajectory was at a medium risk level, that is, although favorable climate conditions could occur to maintain certain viability, the zone towards which the particle headed does not show a high surface of native varieties.

By February 27, the dispersal had a tendency towards the SE in the north of the state and it was within the low risk level, reaching a maximum distance of 39 km with low particle concentration ($1.0 \text{ e}^{-16} \text{ mg m}^{-3}$). The other dispersals obtained with the model showed a tendency towards the SW, beginning at a medium level and ending their trajectory in a low risk level. The highest particle concentration was at approximate distances of 14 km and low concentration at distances of 29 km. The probable zone where pollen was dispersed was low in native maize density. This factor, in addition to the time of viability of the particles, fluctuated between the first 15 and 30 min of the route, causing a probable viability loss for the rest of the trajectory (Figure 2).

In the simulations performed for March 1 and 3, 2010, the dispersals had tendencies towards the SE and SW, respectively, and both at a medium

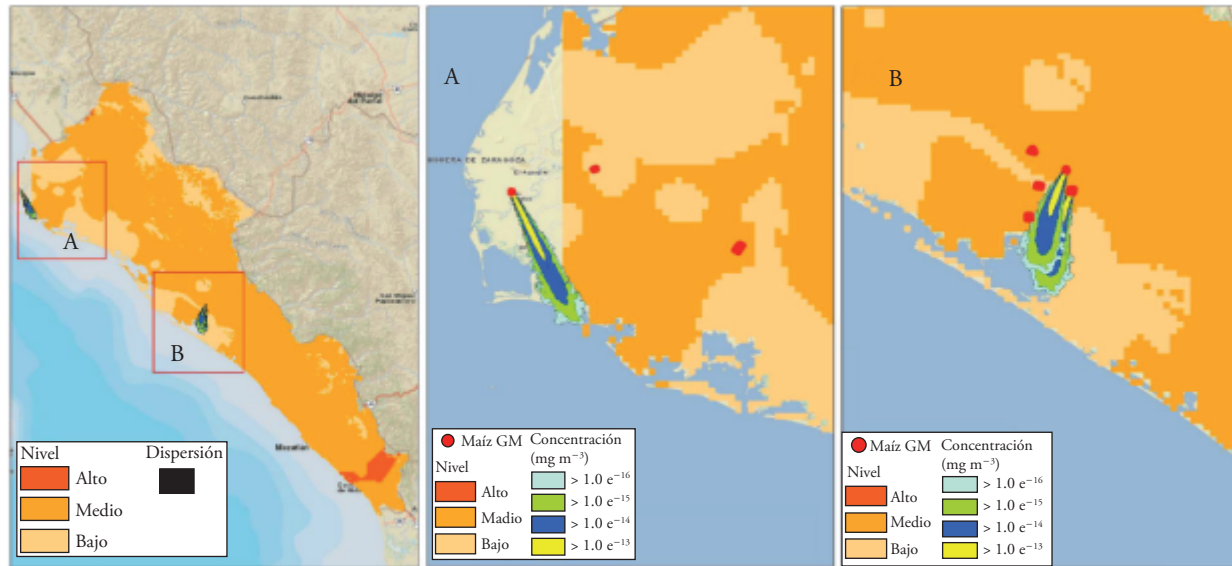


Figura 2. Dispersiones probables de maíz genéticamente modificado para el 27 de febrero de 2010 y su probabilidad correspondiente de riesgo.
Figure 2. Probable dispersal of genetically modified maize for February 27, 2010, and its corresponding risk probability.

la segunda hora de trayecto la partícula pudo haber perdido viabilidad; por lo tanto, el riesgo de polinización fue bajo en los sitios de posible dispersión.

El día 6 de marzo fue uno de los más representativos en términos de dispersión y condiciones climáticas óptimas para facilitar la viabilidad del polen. Las dispersiones obtenidas en el modelo se muestran en la Figura 3, y en el primer mapa se observa una división de dos zonas: la zona A comprende tres dispersiones en la región norte del estado, y la zona B comprende las dispersiones en la región central. En la región norte, las partículas de polen fueron arrastradas en dirección NNO, mientras que en la región central la tendencia fue NO. En algunos casos las dispersiones iniciaron en un nivel de riesgo bajo, alcanzando un nivel medio; en otros la partícula viajó desde un nivel medio y se dispersó en una región de riesgo bajo.

Las distancias de dispersión por cada intervalo de concentración para el 6 de marzo de acuerdo con el modelo de simulación, fueron desde 3.3 hasta 8.6 km en concentraciones de partículas mayores a $1.0 \times 10^{-13} \text{ mg m}^{-3}$; las distancias alcanzadas oscilaron de 11.1 a 19.9 km con concentraciones bajas de $1.0 \times 10^{-16} \text{ mg m}^{-3}$. Aylor *et al.* (2003) mencionan un intervalo de 1 a 4 h para la pérdida de la viabilidad del polen. De manera similar, en este estudio durante el 6 de marzo, las condiciones climáticas permitieron intervalos de viabilidad de la partícula

risk level. Their viability was maintained from 45 to 60 min, that is, half of the trajectory, and the greatest probable dispersal distances for the total trajectory were 16.4 km for day 1 and 33 km for day 3, although the zone where the particles were moved had a low area with native maize. By March 4 and 5, the corresponding tendencies were SE and SW, and the particle viability time was higher than 60 min, although the dispersals were in a zone of medium risk, reaching distances of 13 to 18 km for the total trajectory. When considering the viability time, as well as the characteristics of the zone where the particle moved, it can be concluded that during the second hour of the trajectory the particle could have lost viability; therefore, the risk of pollination was low in the sites of possible dispersal.

March 6 was one of the most representative days in terms of dispersal and optimal climate conditions to facilitate pollen viability. The dispersals obtained in the model are shown in Figure 3, and in the first map a division of two zones is observed: zone A includes three dispersals in the northern region of the state and zone B includes the dispersals in the central region. In the northern region, the pollen particles were pulled in the NNW direction, while in the central region the tendency was NW. In some cases the dispersals began at a low risk level and reached a medium level; in others, the particle travelled from

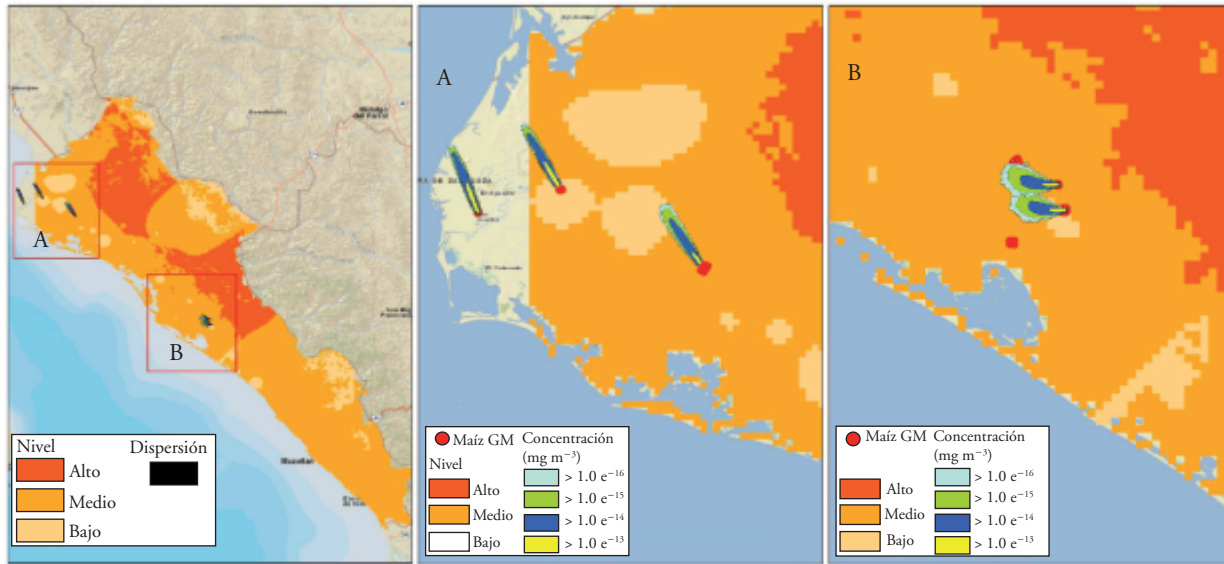


Figura 3. Dispersiones probables de maíz genéticamente modificado para el 6 de marzo de 2010 y su correspondiente probabilidad de riesgo.

Figure 3. Probable dispersal of genetically modified maize for March 6, 2010, and its corresponding risk probability.

mayores a 2 h, pero las dispersiones fueron en zonas de riesgo medio y bajo. Por lo tanto, aunque existió viabilidad de polen, la zona donde ocurrió su movimiento presentaba una baja superficie de maíz nativo expuesta a ser polinizada.

CONCLUSIONES

El modelo HYSPLIT en conjunto con variables relacionadas con distribución de especies, temperatura, HR, velocidad y dirección del viento, viabilidad del polen, así como su peso y velocidad de depósito, se puede emplear como herramienta de apoyo en la toma de decisiones en el establecimiento de distancias de separación de parcelas donde se realicen experimentos con OGM respecto a parcelas convencionales.

El desarrollo de mapas y la aplicación del modelo HYSPLIT permitieron determinar que las zonas donde se ubicaron las parcelas de maíz GM en el año 2010, estaban en una superficie favorable respecto a condiciones de viabilidad y dispersión. Sin embargo, la dirección y velocidad de los vientos no resultaron en dispersiones dentro de la zona de mayor riesgo probable de cruce polínico entre variedades GM y parientes silvestres.

a medium level and was dispersed in a region of low risk.

The dispersal distances for each concentration interval in March 6 according to the simulation model ranged from 3.3 to 8.6 km in concentrations of particles higher than $1.0 \times 10^{-13} \text{ mg m}^{-3}$; the distances reached varied from 11.1 to 19.9 km with low concentrations of $1.0 \times 10^{-16} \text{ mg m}^{-3}$. Aylor *et al.* (2003) mentioned an interval of 1 to 4 h for the loss of pollen viability. Similarly, in this study on March 6 the climate conditions allowed intervals of particle viability greater than 2 h, although the dispersals were in medium and low risk zones. Therefore, although there was pollen viability, the zone where their movement occurred presented a low native maize surface exposed to be pollinized.

CONCLUSIONS

The HYSPLIT model together with variables related to the distribution of species, temperature, RH, wind speed and direction, pollen viability, as well as their weight and deposit speed, can be used as a support tool in decision-making to establish separation distances for plots where experiments are carried out with GMOs with regard to conventional plots.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el otorgamiento de la beca No. 319900. Al Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria SINAVEF por el apoyo y disposición de instalaciones. A Enrique Ibarra, Marcos Casiano y Jesús Ramos por su asesoría en el desarrollo de mapas.

LITERATURA CITADA

- Aheto, D. W., H. Reuter, and B. Breckling. 2011. A modeling assessment of gene flow in smallholder agriculture in West Africa. *Environ. Sci. Eur.* 23(1): 1-10.
- Ahmad, P., M. Ashraf, M. Younis, X. Hu, A. Kumar, N. A. Akram, and F. AL-Qurainy. 2012. Role of transgenic plants in agriculture and biopharming. *Biotechnol. Adv.* 30: 524-540.
- Andrei, C. O., and R. Chen. 2009. Assessment of time-series of troposphere zenith delays derived from the global data assimilation system numerical weather model. *GPS Solut.* 13: 109-117.
- Arritt, R. W., C. A. Clark, A. S. Goggi, H. Lopez-Sanchez, M. E. Westgate, and J. M. Riese. 2007. Lagrangian numerical simulations of canopy air flow effects on maize pollen dispersal. *Field Crop. Res.* 102: 151-162.
- Ashraf, M., and N.A. Akram. 2009. Improving salinity tolerance of plants through conventional breeding and genetic engineering: An analytical comparison. *Biotechnol. Adv.* 27: 744-752.
- Aylor, D.E., N. P. Schultes, and E. J. Shields. 2003. An aerobiological framework for assessing cross-pollination in maize. *Agric. For. Meteorol.* 119: 111-129.
- Baltazar, M. B., J. J. Sánchez-Gonzalez, L. De la Cruz-Larios, and J. B. Schoper. 2005. Pollination between maize and teosinte: an important determinant of gene flow in Mexico. *Theor. Appl. Genet.* 110: 519-526.
- Bannert, M., and P. Stamp. 2007. Cross-pollination of maize at long distance. *Europ. J. Agron.* 27: 44-51.
- Bunting, M. J., and D. Middleton. 2005. Modelling pollen dispersal and deposition using HUMPOL software, including simulating windrows and irregular lakes. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 134: 185-196.
- Chen, J., W. Xu, J. Velten, Z. Xin, and J. Stout. 2012. Characterization of maize inbred lines for drought and heat tolerance. *J. Soil Water Conserv.* 67: 354-364.
- Clive, J. 2012. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2012. ISAAA Briefs 44: 11 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2005. Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados. México, Ciudad de México. 44 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2012. Acuerdo por el que se determinan Centros de Origen y Centros de Diversidad Genética del Maíz. México, Ciudad de México. Segunda Sección. 128 p.
- Draxler, R.R., and G.D. Hess. 1997. Description of the HYSPLIT_4 modeling system. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring. 24 p.
- The development of maps and the application of the HYSPLIT model allowed determining that the zones where the GM maize plots were located in 2010 were in a favorable surface in terms of conditions of viability and dispersal. However, the direction and speed of winds did not result in dispersals within the zone of most probable risk for pollen crosses between GM varieties and wild relatives.
- End of the English version—
- *—
- Efstathiou, Ch., S. Isukapalli, and G. Panos. 2011. A mechanistic modeling system for estimating large-scale emissions and transport of pollen and co-allergens. *Atmos. Environ.* 45: 2260-2276.
- Eklöf, M., A. Broström, M. J. Gaillard, and P. Pilesjö. 2004. OPENLAND3: a computer program to estimate plant abundance around pollen sampling sites from vegetation maps: a necessary step for calculation of pollen productivity estimates. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 132: 67-77.
- Fonseca, A. E., and M. E. Westgate. 2005. Relationship between desiccation and viability of maize pollen. *Field Crop. Res.* 94: 114-125.
- Fonseca A. E., M. E. Westgate, L. Grass, and D. L. Dornbos. 2003. Tassel morphology as an indicator of potential pollen production in maize. *Crop Management*. <http://www.plantmanagementnetwork.org/pub/cm/research/2003/tassel/> (Consulta: julio 2013).
- Fyfe, R. 2006. GIS and the application of a model of pollen deposition and dispersal: a new approach to testing landscape hypotheses using the POLLANDCAL models. *J. Archaeol. Sci.* 33: 483-493.
- Goggi, A. S., P. Caragea, H. Lopez-Sanchez, M. Westgate, R. Arritt, and C. Clark. 2006. Statistical analysis of outcrossing between adjacent maize grain production fields. *Field Crop Res.* 99: 147-157.
- Hellin, J., O. Erenstein, T. Beuchelt, C. Camacho, and D. Flores. 2013. Maize stover use and sustainable crop production in mixed crop-livestock systems in Mexico. *Field Crop Res.* 153: 12-21.
- Hernández-Ceballos, M. A., H. García-Mozo, J. A. Adame, E. Domínguez-Vilches, J. P. Bolívar, B. A. De la Morena, R. Pérez-Badía, and C. Galán. 2011. Determination of potential sources of Quercus airborne pollen in Cordoba city (southern Spain) using back-trajectory analysis. *Aerobiologia* 27: 261-276.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2013. <http://www.inecc.gob.mx/calibre-herramientas-analisis/582-calibre-tipos-modelos> (Consulta: octubre 2013).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2013. <http://cuentame.inegi.gob.mx/monografias/informacion/sin/territorio/clima.aspx?tema=me&e=25> (Consulta: octubre 2013).

- Jaros, N., B. Loubet, B. Durand, A. McCartney, X. Foueillassar, and L. Huber. 2003. Field measurements of airborne concentration and deposition rate of maize pollen. *Agric. For. Meteorol.* 119: 37–51.
- Luna V, S., J. Figueroa M., B. Baltazar, M., R. Gomez L., R. Townsend, and J. B. Schope. 2001. Maize pollen longevity and distance isolation requirements for effective pollen control. *Crop Sci.* 41: 1551–1557.
- Marceau, A., S. Saint-Jean, B. Loubet, X. Foueillassar, and L. Huber. 2012. Biophysical characteristics of maize pollen: Variability during emission and consequences on cross-pollination risks. *Field Crop. Res.* 127: 51–63.
- Messeguer, J., 2003. Gene flow assessment in transgenic plants. *Plant Cell Tiss. Organ Cult.* 73: 201-212.
- Pasken, R., and J. Pietrowicz. 2005. Using dispersion and mesoscale meteorological models to forecast pollen concentrations. *Atmos. Environ.* 39: 7689–7701.
- Pushpangadan, P., T. P. Ijini, V. M. Dan, A. Thomas, S. Avinash, and V. George. 2012. Recent advances of agricultural biotechnology in the light of climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. B. Biol. Sci.* 82: 381-386.
- Ricroch, A., J. B. Bergé, et A. Messéan. 2009. Revue bibliographique sur la dispersion des transgènes à partir du maïs génétiquement modifié. *C. R. Biologies* 332: 861–875.
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). 2013a. Medidas de Bioseguridad para la liberación experimental al ambiente de maíz genéticamente modificado. México. 9 p.
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). 2013b. Medidas de Bioseguridad para maíz genéticamente modificado en programa piloto. México. 5 p.
- Sunnu, A., F. Resch, and G. Afeti. 2013. Back-trajectory model of the Saharan dust flux particle mass distribution in West Africa. *Aeolian Res.* 9: 125–132.
- Viner, B., R., and W. Arritt. 2010. Increased pollen viability resulting from transport to the upper boundary layer. *Field Crop Res.* 119: 195–200.
- Wang F, D.S. Chen, S.Y. Cheng, J.B. Li, M.J. Li, and Z.H. Ren. 2010. Identification of regional atmospheric PM10 transport pathways using HYSPLIT, MM5-CMAQ and synoptic pressure pattern analysis. *Environ. Modell. Softw.* 25: 927-934.
- Wen, D., J. C. Lin, D. B. Millet, A. F. Stein, and R. R. Draxler. 2012. A backward-time stochastic Lagrangian air quality model. *Atmos. Environ.* 54: 373-386.
- Wolt, J. D. 2009. Advancing environmental risk assessment for transgenic biofeedstock crops. *Biotechnol. Biofuels* 2: 27-39.
- Yang, X. Q., S. P. S. Kushwaha, S. Saran, J. Xu, and P. S. Roy. 2013. Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecol. Eng.* 51: 83-87.