

# Modelo de dispersión de polen de maíz transgénico en el municipio de Tierralta (Córdoba, Colombia)

 Carolina Mazo Castaño<sup>1\*</sup>,  Manuel Rodríguez Susa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia

\* Autor de correspondencia: Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental, Carrera 1 # 18A – 12, Edificio Mario Laserna, código postal: 111711 Bogotá, Colombia, [c.mazo10@uniandes.edu.co](mailto:c.mazo10@uniandes.edu.co)

Recibido: 01 de septiembre de 2019

Aceptado: 06 de agosto de 2020

Publicado: 06 de febrero de 2021

*Editor temático:* Roxana Yockteng Benalcazar (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA])

*Para citar este artículo:* Mazo Castaño, C., & Rodríguez Susa, M. (2021). Modelo de dispersión de polen de maíz transgénico en el municipio de Tierralta (Córdoba, Colombia). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(1), e1637. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol22\\_num1\\_art:1637](https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1637)

## Resumen

Los cultivos transgénicos aparecen como respuesta a la preocupación por abastecer la gran demanda alimenticia derivada del crecimiento poblacional. Sin embargo, diferentes autores han argumentado que los transgénicos contaminan genéticamente los cultivos tradicionales y ocasionan la pérdida de la biodiversidad agrícola nativa. Aunque este trabajo no aborda la afectación de los cultivos tradicionales, explica la importancia de este tipo de estudios y su posible uso para investigaciones posteriores. Esta investigación tuvo como objetivo determinar mediante el programa Hysplit® la distancia promedio que alcanzaron los granos de polen de maíz transgénico durante el año 2016 en el municipio de Tierralta, Córdoba. En los resultados, la concentración fue de  $10^{-9}$  mg/m<sup>3</sup> y el promedio anual de la distancia alcanzada por los granos de polen de maíz fue de 500 m. El promedio máximo se registró en el mes de mayo con un valor de 799 m y el promedio mínimo se obtuvo en marzo con un valor de 474 m. Para el análisis de los resultados, se consideró que a comienzos del año 2016, el fenómeno de El Niño en Colombia generó que los granos de polen de maíz viajaran menos que durante un año neutro o un año con el fenómeno de La Niña, debido a los vientos débiles que se presentaron en el Caribe colombiano. En caso de haberse presentado un año neutro o con La Niña, las partículas habrían viajado más porque la fuerza de los vientos estaría por encima de lo normal.

**Palabras clave:** Hysplit®, modelos de simulación, transgénicos, velocidad de deposición, velocidad de sedimentación, *Zea mays*

## Transgenic maize pollen dispersion model in the municipality of Tierralta (Córdoba, Colombia)

### Abstract

Transgenic crops appear as a response to the concern of supplying the high food demand produced by population growth. In this regard, different authors have argued that transgenics contaminate traditional crops genetically, causing the loss of native agricultural biodiversity. Although the significance of this work does not contemplate the affectation of traditional crops, the importance of this type of study and its possible use for subsequent research is explained. The aim of this work was to determine the average distance reached by transgenic maize pollen grains in 2016 in the municipality of Tierralta, Córdoba, using the Hysplit® program. The results show that with a concentration of  $10^{-9}$  mg/m<sup>3</sup>, the annual average distance reached by maize pollen grains was 581 m, recording the highest average in May with a value of 799 m, and the minimum average in March with a value of 474 m. The analysis of results considered that, at the beginning of 2016, Colombia was undergoing the 'El Niño' phenomenon, causing the maize pollen grains to travel less compared to a neutral year or one subjected to the 'La Niña' phenomenon. This is due to the weak winds that occurred in the Colombian Caribbean region. By contrast, in the event of a neutral year or one with the 'La Niña' phenomenon, the particles could have traveled more as the wind strength would have been above normal.

**Keywords:** deposition velocity, Hysplit®, settling velocity, simulation models, transgenics, *Zea mays*

## Introducción

El campo de los organismos genéticamente modificados (OGM) en la agricultura ha sido de gran debate debido a las nuevas tecnologías que se pueden emplear para reducir agroquímicos y problemas de productividad y dada la posibilidad que ofrecen para combatir el hambre y la pobreza en el mundo (Sicard, 2000). No obstante, la introducción de las semillas transgénicas ha desencadenado diferentes desafíos sociales, ambientales, económicos y, posiblemente, de salud pública (Arrázola, 2014). Uno de los principales problemas identificados por los agricultores y los productores de estas semillas es la pérdida de la diversidad agrícola, en parte causada por la transferencia genética horizontal (Sicard, 2000). Según un estudio de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015), durante los últimos 20 años se ha perdido un 75 % de la diversidad agrícola debido a la Revolución verde.

En Colombia, las regiones Andina, Caribe y Orinoquía son las zonas con mayor erosión genética del país, en las que algunas comunidades indígenas y campesinas han perdido numerosas variedades de cultivos básicos como maíz, frijol, yuca, papa, plátano, arroz, ñame, tomate, frutas, plantas medicinales y otros tubérculos (Red Semillas Libres de Colombia y Grupo Semillas, 2015).

Otro de los problemas identificados es la pérdida de la fauna y la microbiota que habitan en el suelo. Algunos artrópodos, gusanos y microorganismos proveen beneficios al suelo del ecosistema agrícola, ya que, al mezclar las capas superiores, redistribuyen los nutrientes y aumentan la infiltración del suelo (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2008). Sin embargo, esta característica se pierde cuando los cultivos modificados ocasionan la muerte de algunos insectos que cumplen estas funciones (Peterson et al., 2011).

Además de alterar la fauna, la introducción de semillas transgénicas tiene efectos en la reglamentación de servicios, pues, al modificar el ciclo del agua, genera mayor demanda de este recurso en algunas ocasiones (Reyes et al., 2010). Adicionalmente, modifica los servicios culturales, ya que se pierden frutos tradicionales que funcionan como valor estético y religioso para las comunidades indígenas (Corporación Grupo Semillas, 2017). En 2017, la Corporación Grupo Semillas presentó ante la Organización de las Naciones Unidas un informe sobre la vulneración de los derechos humanos en pueblos indígenas debido al uso de los OGM. En este informe, se menciona que en Colombia la cultura en torno al maíz se ve fuertemente afectada en los pueblos kamëntsa, nasa, guambiano, inga, yanakona, arhuaco, kogui, pasto, embera chamí y pijao (Corporación Grupo Semillas, 2017).

Monsanto (hoy Bayer) es una de las principales compañías en el mercado de la agricultura. En Colombia, esta empresa ha comercializado herbicidas y semillas transgénicas de maíz, soya, arroz y algodón en los departamentos de Córdoba, Huila, Valle del Cauca, Tolima, Nariño y Meta (Ministerio de Agricultura, s.f.).

Su impacto en el sector agrícola ha sido tal que, en la Resolución 3168 de 2015 emitida por el Instituto Colombiano Agropecuario, se prohíbe comercializar e intercambiar semillas criollas y nativas y reservar la cosecha del cultivo, con excepción del arroz, la soya y el algodón (Vélez, 2015). Esta medida, al parecer, fue implementada con el fin de proteger la propiedad intelectual de la compañía y evitar que se mezclen las semillas tradicionales con las transgénicas. Sin embargo, se han registrado casos de contaminación genética debido al intercambio de semillas, la polinización y la dispersión del polen en masas de aire (Blanco, 2012).

En Colombia se siembran algunos OGM como algodón, trigo, soya, flor azul, papa, sorgo, tomate, remolacha azucarera, maíz, arroz y canola (Resolución 946, 2006). De los 134 cultivos genéticamente modificados que se solicitaron hasta el 2017, 104 han sido autorizados y 28 están en proceso de autorización por el Ministerio de Salud y Protección Social, el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (Invima) o el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Resolución 946, 2006), con mayor registro de área sembrada y cosechada en los departamentos de Meta, Tolima, Vichada y Córdoba.

En Córdoba, principalmente en los municipios de Tierralta, Montería y Loricá, se registra una alta siembra de maíz tradicional, que representa un valor ecológico natural con incidencia regulatoria en el ecosistema y un valor estético y religioso para las comunidades que habitan en este territorio. Este es el tercer departamento con mayor siembra de transgénicos, actividad predominante en los municipios de Montería, Ciénaga de Oro y Cereté (Ministerio de Agricultura, s. f.). Los departamentos en los cuales se siembran tanto cultivos transgénicos como tradicionales son más susceptibles a la pérdida de especies nativas y tienen mayor riesgo de alteración del ecosistema cuando el área sembrada de transgénicos es significativamente mayor que el área de cultivos tradicionales (Chaparro, 2009). En dichos casos, es necesario estudiar los terrenos involucrados para conocer los posibles riesgos de estas prácticas. Adicionalmente, se debe considerar que la transferencia de genes hacia poblaciones silvestres depende de varios factores: debe existir un medio de transporte y las especies silvestres deben ser sexualmente compatibles, crecer juntas en el mismo lugar y florecer al mismo tiempo (Chaparro, 2009).

El riesgo de flujo de genes depende del cultivo, pues algunos no reciben el gen, ya sea por lejanía, por diferentes épocas de floración o por dificultad para recibir genes que no pertenecen a su genotipo. Además, en las plantas receptoras existe la posibilidad de que el transgén se pierda en las generaciones siguientes (Chaparro, 2009). No obstante, de presentarse el flujo de genes, puede generar riesgos asociados a la evolución de especies invasoras agresivas y la extinción de especies nativas.

El objetivo de este trabajo fue determinar mediante el modelo Hysplit® las distancias probables que alcanza una masa de granos de polen de maíz transgénico según las condiciones climáticas a lo largo del año en un lote cultivado en Tierralta, Córdoba. De esta manera, se puede determinar los lugares expuestos a esta masa de polen según la época del año. Para el análisis de los resultados, se tomaron en cuenta las recomendaciones de Aylor et al. (2006) y Fonseca y Westgate (2005) sobre la distancia máxima que recorren los granos de polen por debajo de la capa límite advectiva, que generalmente es de 1 km. Con base en esto, el presente estudio se enfocó en el transporte que ocurre en la superficie de la atmósfera (2,5-100 m sobre el nivel del suelo), de manera que las consideraciones que pudiesen resultar del viaje por encima de la capa límite advectiva exceden el alcance de este trabajo.

## Materiales y métodos

### Localización del cultivo transgénico de maíz

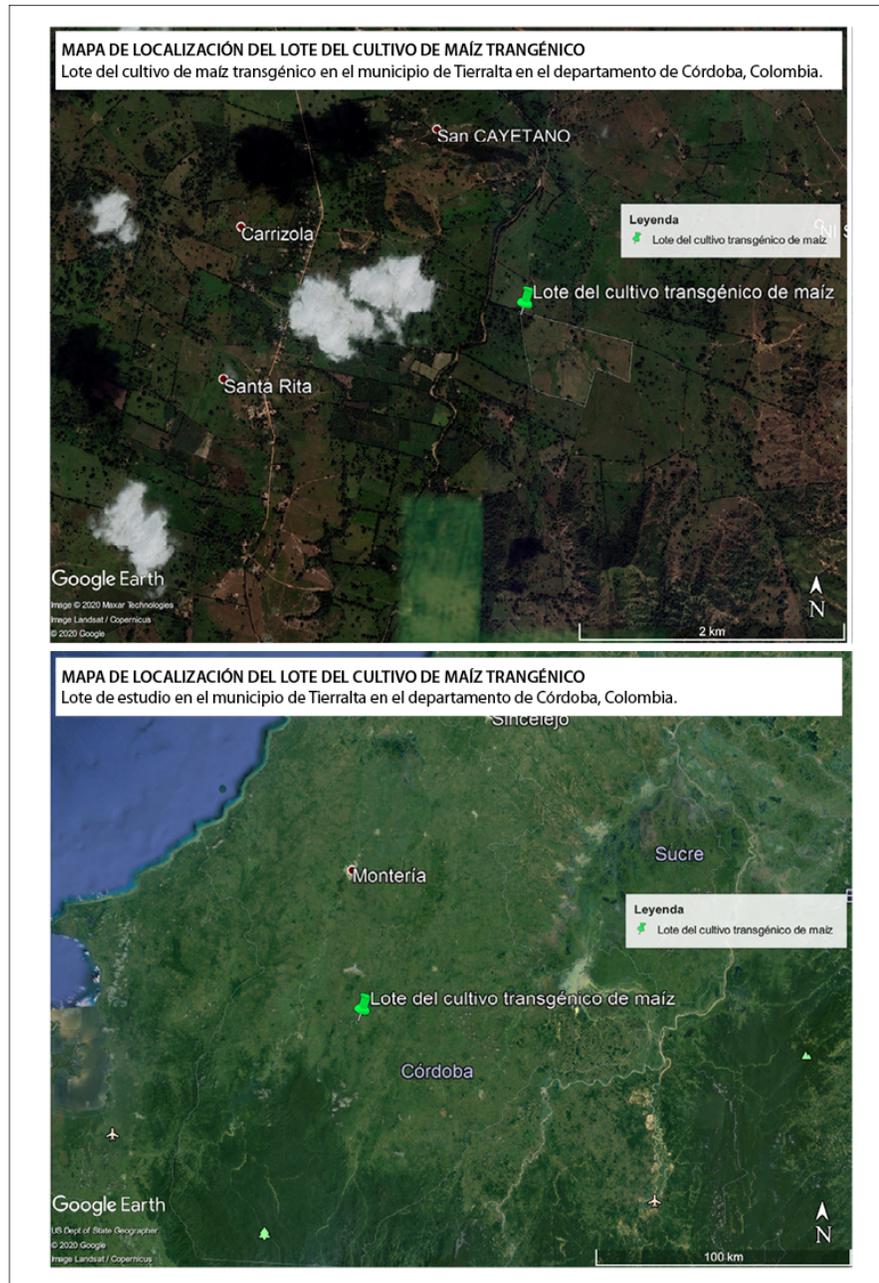
Actualmente, en el departamento de Córdoba el arroz y el maíz representan el 9 % y el 35 %, respectivamente, de la siembra total entre cultivos tradicionales y genéticamente modificados (GM). Asimismo, el departamento cuenta con unos porcentajes mínimos de frijol, ajonjolí, patilla, tomate, ahuyama, ají dulce, berenjena y otras hortalizas (Portafolio, 2018). Respecto al maíz transgénico, el área cosechada y la producción han registrado leves cambios entre los años 2007 y 2017. La producción registró un aumento desde 2012 hasta 2015, tal vez debido a la implementación del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos en 2012, gracias al cual varias industrias de semillas GM comenzaron a vender sus productos en Colombia. El área también registra un crecimiento desde 2012, aunque los cambios no han sido tan significativos como en la producción. Esto se traduce en una mayor producción con un menor uso de área, posiblemente gracias a la eficiencia de los transgénicos. En este departamento son más los municipios que siembran maíz tradicional (23) que los que siembran maíz transgénico (16). A pesar de esto, el área total sembrada con maíz GM entre los 16 municipios sobrepasa el área de los cultivos tradicionales.

Debido a la reservada información sobre la localización de los cultivos que brindan los diferentes organismos encargados de la venta y supervisión de transgénicos, se optó por usar la información que la Organización Nacional Indígena de Colombia (ONIC) ha presentado en sus informes sobre la localización de los cultivos transgénicos y los cultivos criollos en Colombia (Semillas de Identidad, 2018). Así, se logró establecer un polígono tentativo de un cultivo modificado de maíz en Tierralta, Córdoba para el año 2015 (tabla 1, figura 1).

**Tabla 1.** Localización del lote de cultivo transgénico de maíz en el municipio de Tierralta, Córdoba

Zona	Latitud (N)	Longitud (W)
Noreste	08°13'12,96"	75°51'13,16"
Sureste	08°12'56,18"	75°51'25,79"
Noroeste	08°13'20,60"	75°51'43,05"
Suroeste	08°12'59,78"	75°51'39,19"

Fuente: Elaboración propia



**Figura 1.** Mapa de la localización del lote de cultivo de maíz transgénico en el municipio de Tierralta, Córdoba.  
Fuente: Elaborado por los autores basados en Google Earth

### Hysplit®

Se utilizó el modelo Hysplit® (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) para modelar la dispersión de partículas en el viento dependiendo de su peso, diámetro, velocidad de deposición y condiciones del ambiente.

El modelo Hysplit® funciona de dos maneras: la primera (*backward*) permite establecer si los altos niveles de contaminación en un lugar son causados por el transporte de contaminantes provenientes de otro lugar, es decir, las rutas de procedencia; la segunda (*forward*) se usa para predecir cómo se comporta una masa de aire con respecto a ciertas condiciones meteorológicas, es decir, las rutas de dispersión (National Oceanic and Atmospheric Administration, s. f.). Las limitaciones de este modelo incluyen que a) no tiene en cuenta terrenos complejos ni estructuras como edificaciones que puedan interferir en la dispersión, b) no toma en cuenta reacciones químicas, c) no considera la resuspensión y d) supone que la tasa de emisión es constante.

### Viabilidad en la transferencia

La viabilidad es la capacidad que tienen los granos de polen para desarrollarse (Corazza et al., 2016). Esta cualidad disminuye a medida que baja el contenido de humedad del grano; la pérdida de humedad, a su vez, está determinada por el déficit de presión de vapor de la atmósfera: si la atmósfera es caliente y seca, el déficit es mayor y los granos de polen pierden humedad y viabilidad. En condiciones frías y húmedas, la retención de humedad produce mayor viabilidad (Viner & Arritt, 2010).

El déficit de presión de vapor disminuye con la altura, de modo que el polen es más viable cuando está a una altura entre los 100 m y los 1.000 m sobre el nivel del suelo. Además, los vientos horizontales en esta altitud son más fuertes, por lo que el transporte resulta más eficiente. Los granos de polen de maíz pueden elevarse hasta los 1.000 m sobre el nivel del suelo y si superan esta altura, la viabilidad del polen se vuelve impredecible debido al aumento del déficit de presión de vapor, el leve aumento de la temperatura y la velocidad del viento constante (Corazza et al., 2016; Viner & Arritt, 2010;). Viner y Arritt (2010) recomendaron que si se realiza un modelo de dispersión de polen solo con información meteorológica, lo más aceptable es que sea por debajo de los 150 m de altitud.

Por otro lado, dado que la dispersión del polen de maíz varía según las características meteorológicas, es de esperarse que su dispersión y viabilidad cambien a lo largo del día y del año. Según el estudio de Marceau et al. (2011), en Francia el inicio y el pico de emisión del polen de maíz comienzan en la mañana, pero se retrasan cuando la humedad relativa es alta y la velocidad del viento baja. Asimismo, Martin et al. (2010) observaron que en Estados Unidos la dispersión del polen de las herbáceas comienza en la mañana y alcanza un máximo al mediodía, con picos menores en la tarde. El mismo comportamiento tiene el polen de maíz según el modelo matemático de Viner et al. (2010). De igual modo sucede en Cuba, donde la dispersión del polen de la familia Poaceae comienza en la mañana, alcanza una concentración máxima al mediodía y disminuye en la tarde (Aira et al., 2018).

Según los estudios anteriores, en la mayoría de los días, la dispersión del polen comienza en las horas de la mañana y alcanza su punto máximo al mediodía, con otros picos en la tarde. Esto se debe a que, a medida que avanza el día, generalmente la temperatura aumenta mientras que la humedad relativa disminuye, lo que produce que el grano de polen pese menos y viaje más (Fonseca & Westgate, 2005).

Con respecto a la viabilidad, en el polen de maíz expuesto a condiciones de campo seco y caliente esta cualidad disminuye un 20 % en una hora y un 100 % en dos horas (Fonseca & Westgate, 2005). La viabilidad depende también de la receptividad del pistilo, las reacciones de incompatibilidad y el desarrollo pospolinización del embrión (Fonseca & Westgate, 2005).

## Características del polen de maíz para introducir al modelo Hysplit®

Las características del polen como el peso, la densidad y la velocidad de deposición dependen del déficit de presión; por lo tanto, estos valores se modificaron para cada simulación en el modelo según la humedad relativa y la temperatura del día en cuestión.

### *Diámetro*

El diámetro del polen de maíz oscila entre 80-125  $\mu\text{m}$ . En este modelo, se usó un diámetro de 102,5  $\mu\text{m}$  asumiendo una esfera regular (Hofmann et al., 2014).

### *Peso*

Su peso promedio es de aproximadamente 0,25  $\mu\text{g}$  y aumenta o disminuye según el déficit de presión de vapor (Baltazar et al., 2015). La regresión que se usó para determinar el peso dependiendo de la presión de vapor se presenta más adelante.

### *Densidad*

Con el diámetro y la masa del polen es posible determinar su densidad en diferentes condiciones meteorológicas.

## Hora de estudio

Los modelos se realizaron a las 7:00 a. m. hora local (12:00 p. m. UTC), ya que entre esta hora y las 11:00 a. m. ocurre la mayor dispersión del polen de maíz (Daniel & Boffey, 2001, citado por Henry et al., 2003). Del mismo modo, esta hora era ideal de acuerdo con la información meteorológica disponible para realizar los cálculos de la velocidad de sedimentación.

La velocidad de sedimentación de una partícula varía a lo largo del día según los cambios en la temperatura, la humedad relativa y el déficit de presión de vapor. De modo que en las horas de la mañana, donde la humedad es más alta, la temperatura más baja y el déficit bajo, la partícula aumentará su peso y su velocidad de sedimentación, lo que significa que caerá más rápidamente y alcanzará menores distancias. Sin embargo, a medida que avanza el día, aunque el polen se seca y se transporta más lejos, tiene una viabilidad menor y la tasa de germinación disminuye (Chamecki et al., 2011).

## Tiempo y época de simulación

La simulación se llevó a cabo durante un periodo de dos horas, ya que la partícula pierde viabilidad luego de este tiempo (Fonseca & Westgate, 2005). Se determinaron los meses de antesis del maíz en el departamento de Córdoba para insertar las fechas más probables de dispersión de polen en el modelo. Según la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya (2018), las mayores cosechas en este departamento se realizan en los meses de agosto, septiembre y octubre, y en menor medida

en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. Teniendo en cuenta que la antesis ocurre entre 2,5 y 1,5 meses antes de la cosecha (Ospina, 2015), el episodio de antesis en este lote ocurrió entre los meses de enero y septiembre. Por tal motivo, no se hicieron simulaciones para los meses de octubre, noviembre y diciembre.

## Objeto de estudio

Una planta de maíz puede liberar entre 5 y 50 millones de granos de polen por temporada, de modo que si se calcula una densidad de 7 a 12 plantas/m<sup>2</sup>, un campo de maíz de 1 ha libera cerca de 1,0<sup>11</sup> a 1,0<sup>13</sup> granos de polen durante la época de floración (Hofmann et al., 2014). De acuerdo con la literatura, una antera de una planta de maíz contiene entre 2.000 y 2.500 granos de polen (Ma et al., 2008), por lo cual se decidió que el total de partículas o *puff* (según el lenguaje del modelo) a introducir en Hysplit® sería 2.500.

## Distancia vertical

Para introducir al modelo Hysplit®, se escogió una altura inferior a 2,5 m sobre el nivel del suelo, que corresponde a la altura de la planta de maíz (*bottom height*) según Ospina (2015), y una altura superior a 100 m (*top height*), ya que a una altura mayor el objeto de estudio sobrepasa la capa límite y las condiciones del ambiente cambian drásticamente (Pasquet et al., 2008).

## Velocidad de sedimentación

La velocidad de asentamiento del polen de maíz oscila entre 0,15 m/s y 0,4 m/s con un promedio de 0,2 m/s. Es decir, al calcular una altura media entre 2,5 m y 3,5 m, el polen se depositará en 10-20 segundos con un aire tranquilo (Hofmann et al., 2014). El cambio en la velocidad de sedimentación depende de la densidad de la partícula y la densidad y viscosidad del aire, factores que dependen, a su vez, de la humedad relativa y la temperatura.

## Información meteorológica

El modelo Hysplit® contiene un banco de datos denominado Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS, por su sigla en inglés), que se ejecuta cuatro veces al día y utiliza un tiempo de análisis y pronóstico de 3, 6 y 9 horas. Este programa trabaja con tres tipos de cuadrícula: 1° × 1°, 0,5° × 0,5° y 0,25° × 0,25°, los cuales definen la resolución de los datos meteorológicos (National Oceanic and Atmospheric Administration, s. f.), de modo que a mayor grado de cuadrícula, menor resolución. La escala 0,25° × 0,25° podría ser útil para resultados de dispersión de largas distancias (Draxler, s. f.). En esta investigación se trabajó con la cuadrícula 0,5° × 0,5°.

Por otro lado, se utilizó el banco de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam, 2016) para consultar los valores de temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento registrados a las 7:00 a. m. (hora local) en Tierralta durante las fechas del año 2016 consideradas en el estudio. Esto permitió determinar los parámetros ambientales locales que afectan la dispersión en el aire. La información corresponde a la estación Caramelo [13060030] del Ideam ubicada en Tierralta, Córdoba, la cual está localizada a 13 km al noroccidente de la zona de cultivos transgénicos. También se utilizó información complementaria de la estación Maracayo [13065010] ubicada a 20 km al noroccidente.

## Cálculo de la velocidad de sedimentación

Entre los parámetros que solicita el modelo Hysplit® se encuentra la velocidad de sedimentación ( $V_s$ ) de la partícula, que depende de la humedad relativa y la temperatura ambiente. Esta variable indica la distancia que recorre la partícula y la concentración del objeto de estudio en la masa de aire. Se aplicó la ecuación 1 para todas las mañanas (7:00 a. m. hora local).

$$V_s = \frac{2(\rho_P - \rho_A)g r^2}{9\mu} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $\rho_P$  corresponde a la densidad de la partícula,  $\rho_A$  a la densidad del aire,  $g$  a la gravedad,  $r$  al radio de la partícula y  $\mu$  a la viscosidad dinámica del aire.

### Densidad del aire ( $kg/m^3$ )

Para insertar los valores correspondientes en la ecuación, en primer lugar, se debe calcular la densidad del aire  $\rho_A$  según la humedad relativa y la temperatura (LMNO Engineering, Research and Software, s. f.). Para este cálculo, se aplicó la ecuación 2.

$$\rho_A = \frac{pMa}{RT} \left[ 1 - X_v \left( 1 - \frac{M_v}{Ma} \right) \right] \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $p$  es la presión atmosférica en pascales (Pa),  $Ma$  es la masa molar del aire seco (0,02896 kg/mol),  $R$  es la constante universal de los gases 8,3145 J/kmol,  $T$  es la temperatura en kelvin,  $X_v$  es la fracción molar de vapor de agua y  $M_v$  es la masa molar del vapor de agua (0,0180 kg/mol). Para calcular  $X_v$ , se utilizó la ecuación 3.

$$X_v = \frac{h}{100} (\alpha + \beta p + \gamma t^2) \left( e^{\frac{(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T})}{p}} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde  $h$  es la humedad relativa,  $t$  es la temperatura en centígrados y las constantes A, B, C, D,  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son:

$$\alpha = 1,0062$$

$$\beta = 3,14 \cdot 10^{-8}$$

$$\gamma = 5,6 \cdot 10^{-7}$$

$$A=1,24*10^{-5}$$

$$B=1,91*10^{-2}$$

$$C=3,939$$

$$D=-6,34*10^{-3}$$

### *Densidad de la partícula*

También se calculó la densidad de la partícula al cambiar el peso según la humedad relativa, la temperatura y el déficit de presión de vapor. El diámetro de la partícula se mantiene constante, ya que, como indican Bunderson y Leventin (2014), a pesar de que la partícula gana peso cuando hay mayor humedad relativa porque absorbe una mayor cantidad de vapor de agua, el diámetro no cambia significativamente. La cantidad de masa que gana la partícula cambia según el déficit de presión de vapor, el cual depende, a su vez, de la humedad y la temperatura del ambiente. Para calcular el déficit de presión de vapor, se usó la metodología propuesta por Gómez y Cadena (2017):

1. Presión de saturación de vapor a la temperatura máxima del aire  $e^0 T_{\max}$  (Kpa):

$$e^0 T_{\max} = 0,618 \exp \left[ \frac{17,27 T_{\max}}{T_{\max} + 237,3} \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $T_{\max}$  es la temperatura máxima del aire según los datos de la estación del Ideam.

2. Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima del aire  $e^0 T_{\min}$  (Kpa):

$$e^0 T_{\min} = 0,618 \exp \left[ \frac{17,27 T_{\min}}{T_{\min} + 237,3} \right] \quad \text{Ecuación 5}$$

3. Presión de vapor media de saturación ( $e_s$ ):

$$e_s = \frac{e^0 T_{\max} + e^0 T_{\min}}{2} \quad \text{Ecuación 6}$$

4. Presión de saturación de vapor a la temperatura promedio del aire  $e^0 T_{\text{prom}}$  (Kpa):

$$e^0 T_{prom} = 0,618 \exp \left[ \frac{17,27 T_{prom}}{T_{prom} + 237,3} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $T_{prom}$  es la temperatura del aire en el momento del estudio (7:00 a. m.).

5. Presión real de vapor  $e_a$  (Kpa):

$$e_a = \frac{HR_{media} * e^0 T_{prom}}{100} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde  $HR_{media}$  es la humedad en el momento de estudio (7:00 a. m.).

6. Déficit E (Kpa):

$$E = e_s - e_a \quad \text{Ecuación 9}$$

La masa de la partícula ( $M_p$ ) cambia con respecto al déficit según la relación logarítmica de la ecuación 10 (Bunderson & Levetin, 2014).

$$M_p (\mu g) = -0,017 \ln(VPD) + 0,2993 \quad \text{Ecuación 10}$$

Esta ecuación se aplicó para los diferentes días de estudio de enero a septiembre a las 7:00 a. m. con el fin de hallar la densidad de la partícula y, posteriormente, la velocidad de sedimentación de cada día.

#### *Viscosidad dinámica del aire*

Para calcular la viscosidad del aire, se empleó la ecuación 11 (LMNO Engineering, Research and Software, s. f.).

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{a}{b} \right) \left( \frac{T}{T_0} \right)^{2/3}$$

$$a = 0,555 T_0 + C$$

$$b = 0,555 T + C \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde  $\mu_0$  es la viscosidad de referencia en centipoise a temperatura de referencia  $T_0$ ,  $T_0$  es la temperatura de referencia en grados Rankine,  $T$  es la temperatura de entrada en grados Rankine y  $C$  es la constante de Sutherland. Así, las constantes tienen los siguientes valores para el aire:

$$\text{Temperatura de referencia } (T_0) = 524,0 \text{ R}^\circ$$

$$\text{Constante de Sutherland } (C) = 120$$

$$\text{Viscosidad de referencia } T_0 (\mu_0) = 0,01827 \text{ cP}$$

Con estas tres variables, es posible calcular la velocidad de sedimentación de la partícula con respecto a la humedad relativa, la temperatura de los días y la hora de estudio. Asimismo, se debe tener en cuenta la velocidad de depósito, que depende de la velocidad de sedimentación y otros factores aerodinámicos del aire (Sportisse, 2010). En este trabajo, la velocidad de depósito fue calculada por el modelo a partir de la velocidad de sedimentación y las condiciones meteorológicas del día de estudio.

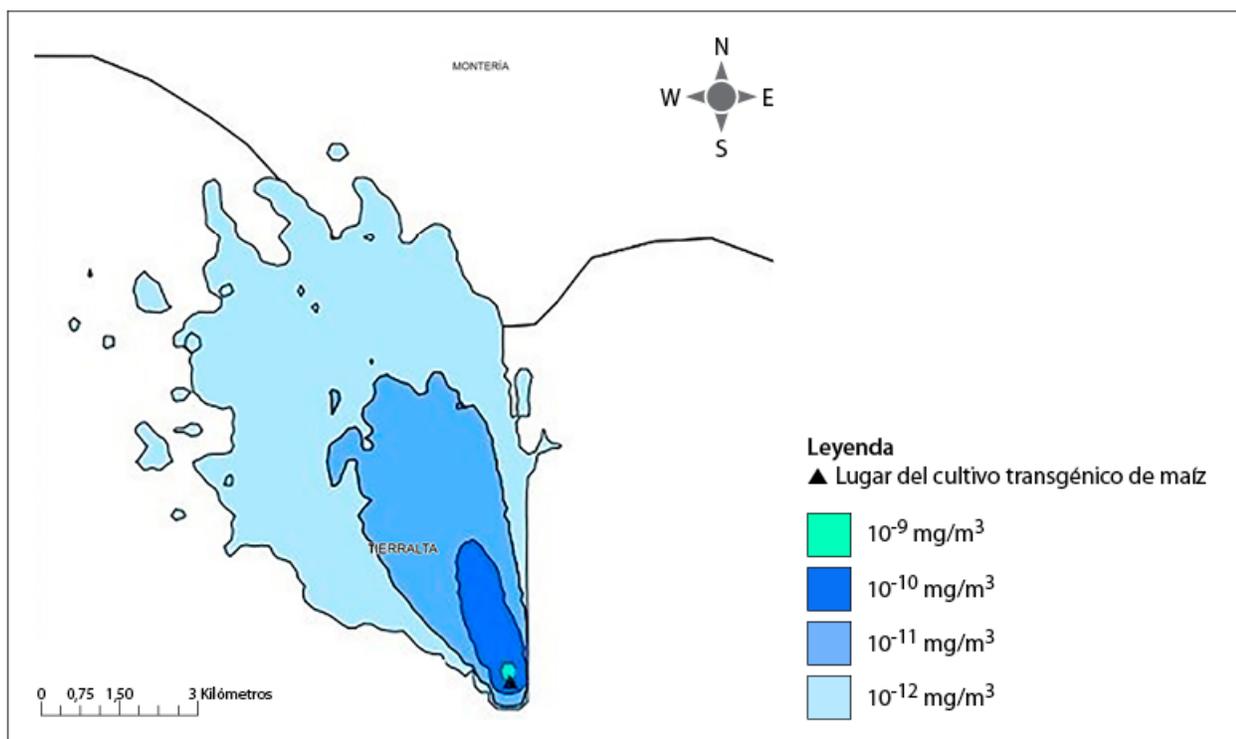
## Resultados y discusión

Para la modelación de los escenarios, se seleccionó, con una confiabilidad del 90 % y un error muestral del 10 %, una muestra mensual de 21 días, que generó un total de 189 simulaciones para los primeros nueve meses del año. Con estas simulaciones, se midieron las distancias recorridas por el polen de maíz y se realizó un promedio mensual para los meses de estudio. La tabla 2 muestra las simulaciones mensuales cuyo resultado está cercano al promedio mensual de la distancia recorrida por el polen; en seguida, estas nueve simulaciones se presentan en mapas que ilustran la dispersión del polen en cada día de estudio (figuras 2 a 10).

**Tabla 2.** Velocidades de sedimentación cercanas a la media calculadas con la información meteorológica de las 7:00 a. m. en el municipio de Tierralta

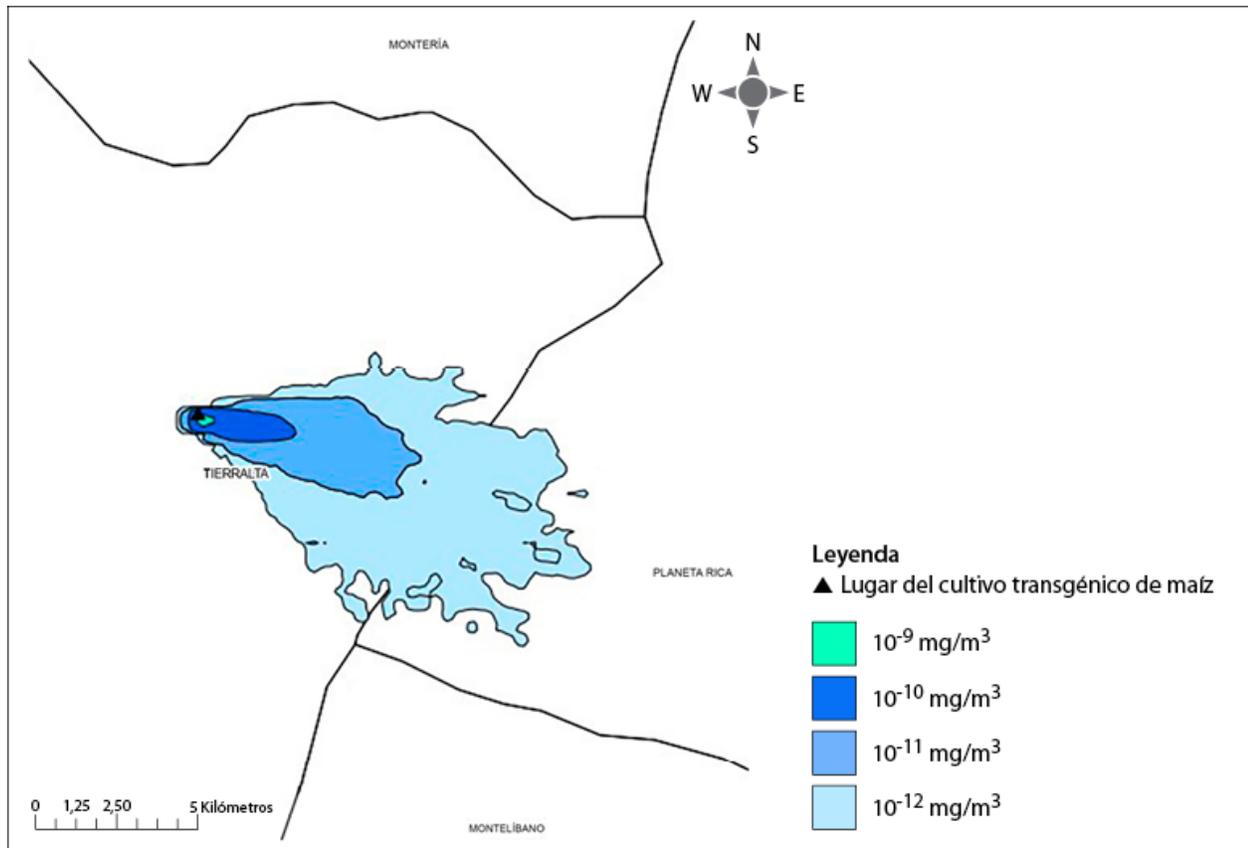
N.º de simulación	Velocidad de sedimentación (m/s)	Fecha	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)	Déficit de presión de vapor de la atmósfera (HPa)
1	0,135	03/01/2016	90	25,4	3,03
2	0,123	12/02/2016	90	24,2	4,34
3	0,135	06/03/2016	92	24,6	2,99
4	0,108	20/04/2016	83	26	5,93
5	0,150	10/05/2016	92	24	1,33
6	0,135	03/06/2016	90	24,4	2,98
7	0,171	22/07/2016	100	27	0,00
8	0,134	15/08/2016	92	25	4,11
9	0,141	02/09/2016	92	23,8	2,38

Fuente: Elaboración propia



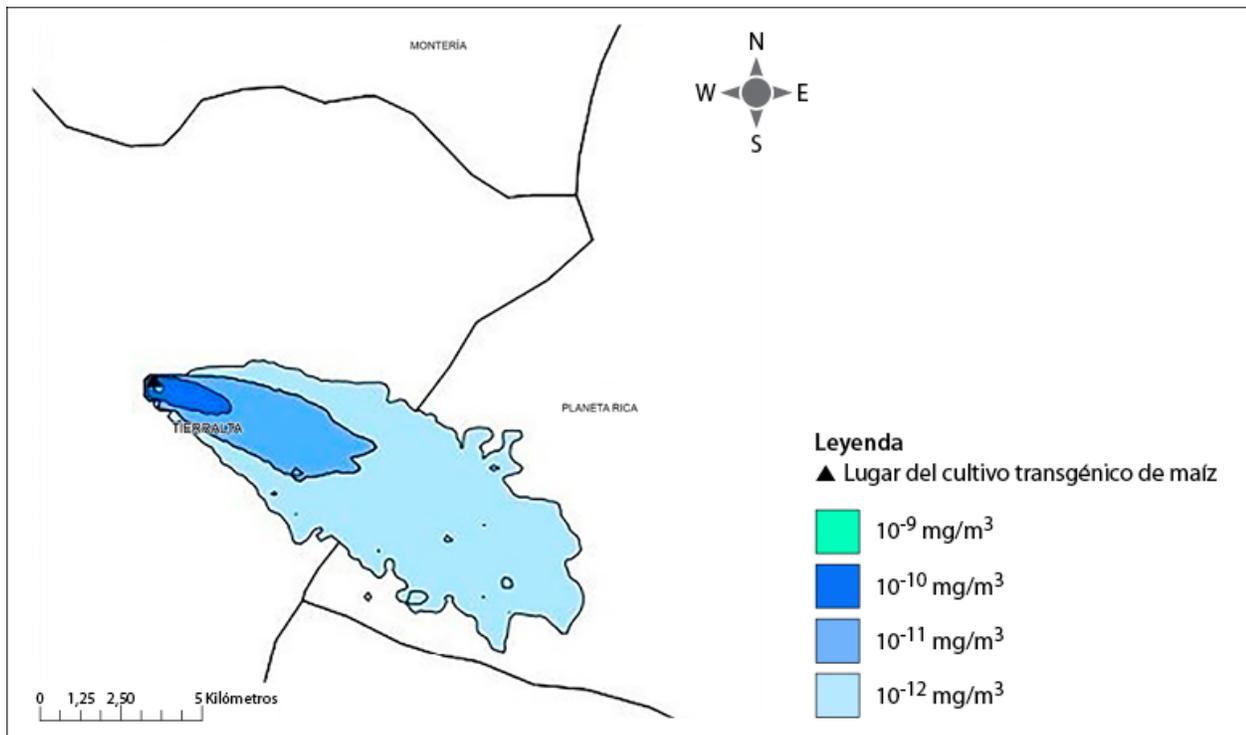
**Figura 2.** Simulación n.º 1, que representa la distancia cercana a la media alcanzada por el polen de maíz en enero. Día de la simulación: 03/01/2016.

Fuente: Elaboración propia



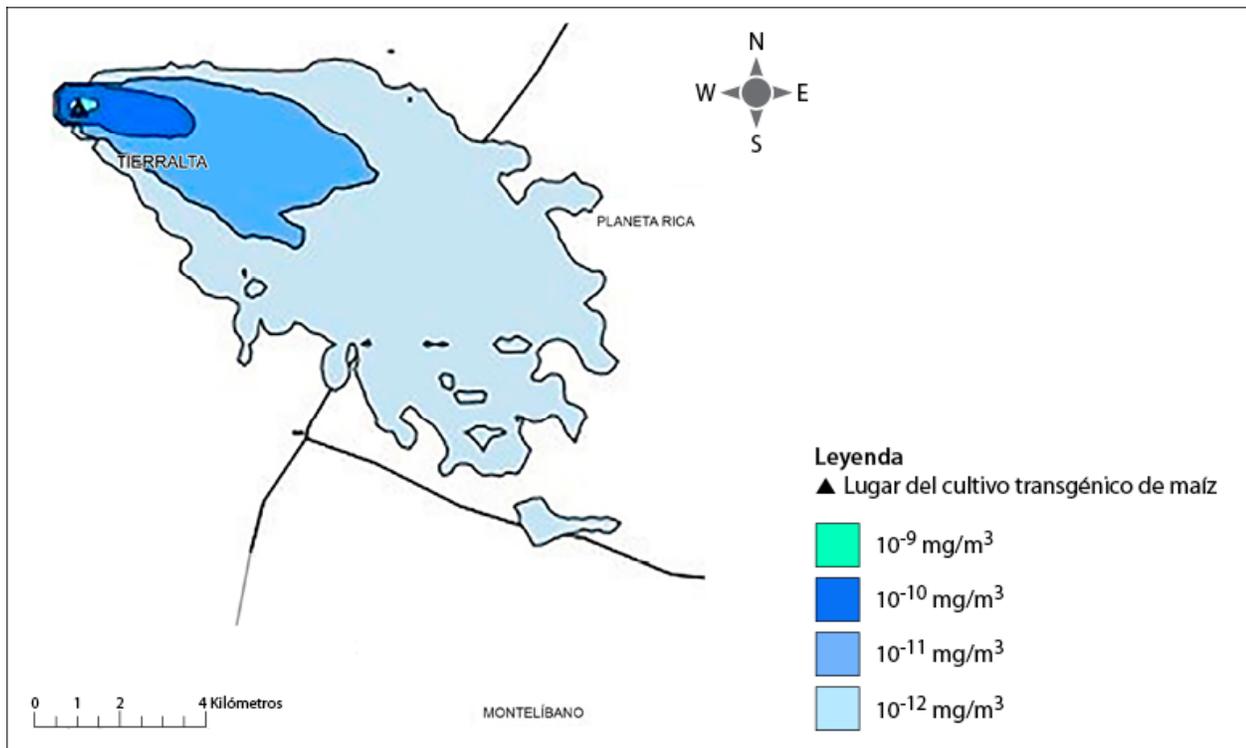
**Figura 3.** Simulación n.º 2, que representa la distancia cercana a la media alcanzada por el polen de maíz en febrero. Día de la simulación: 12/02/2016.

Fuente: Elaboración propia

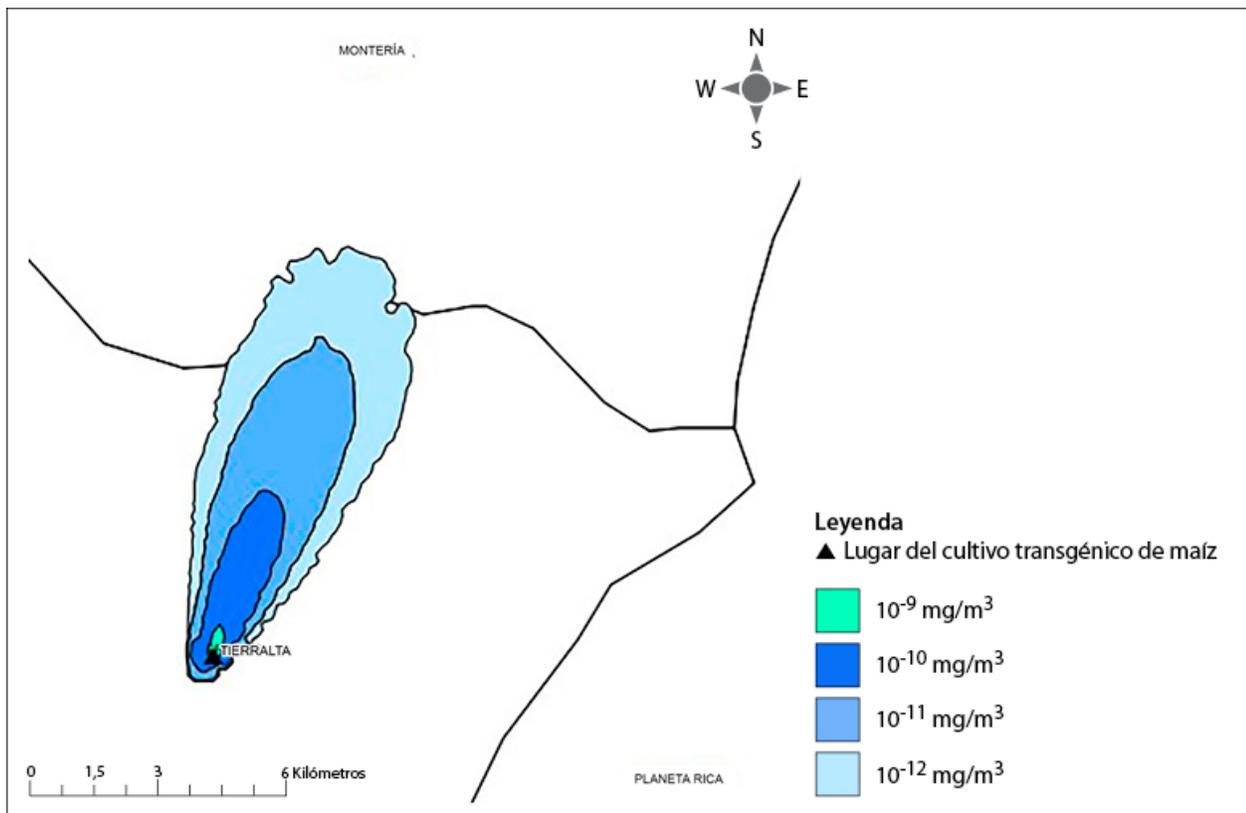


**Figura 4.** Simulación n.º 3, que representa la distancia cercana a la media alcanzada por el polen de maíz en marzo. Día de la simulación: 06/03/2016.

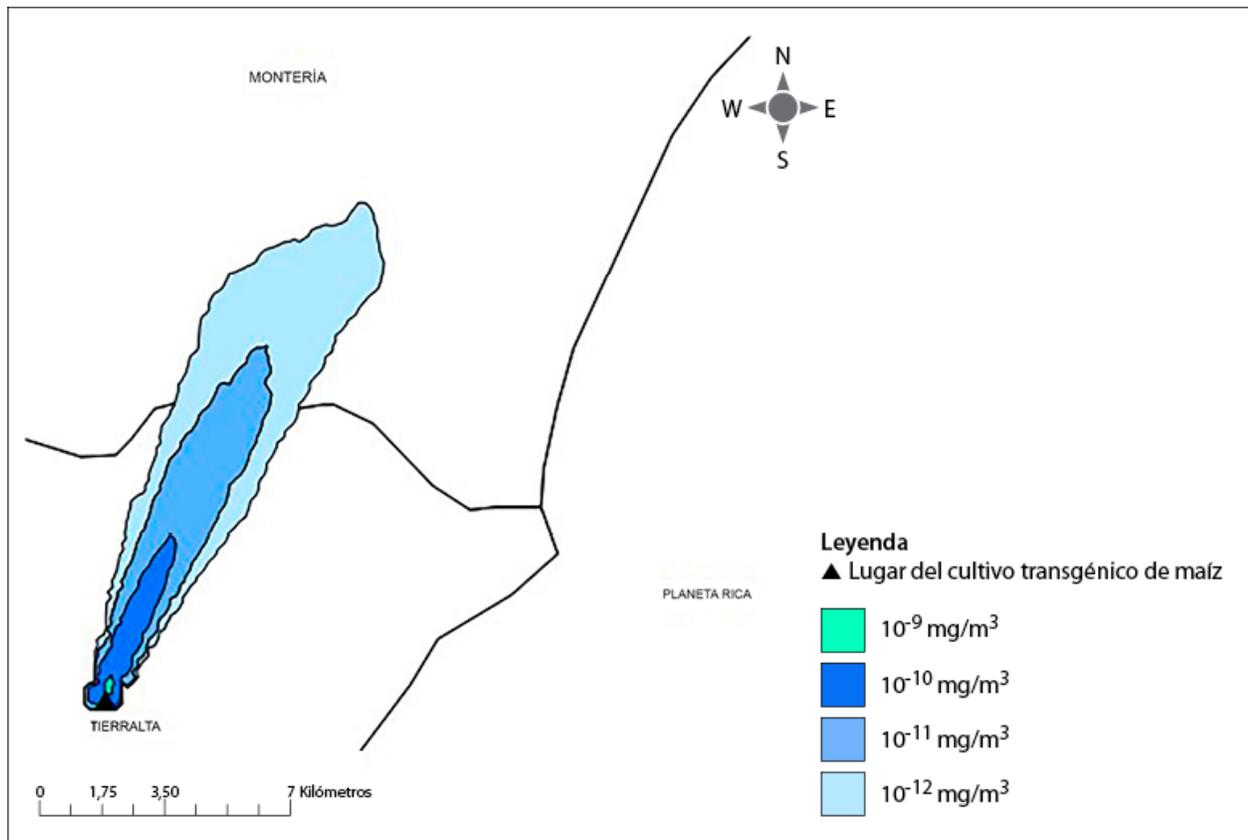
Fuente: Elaboración propia



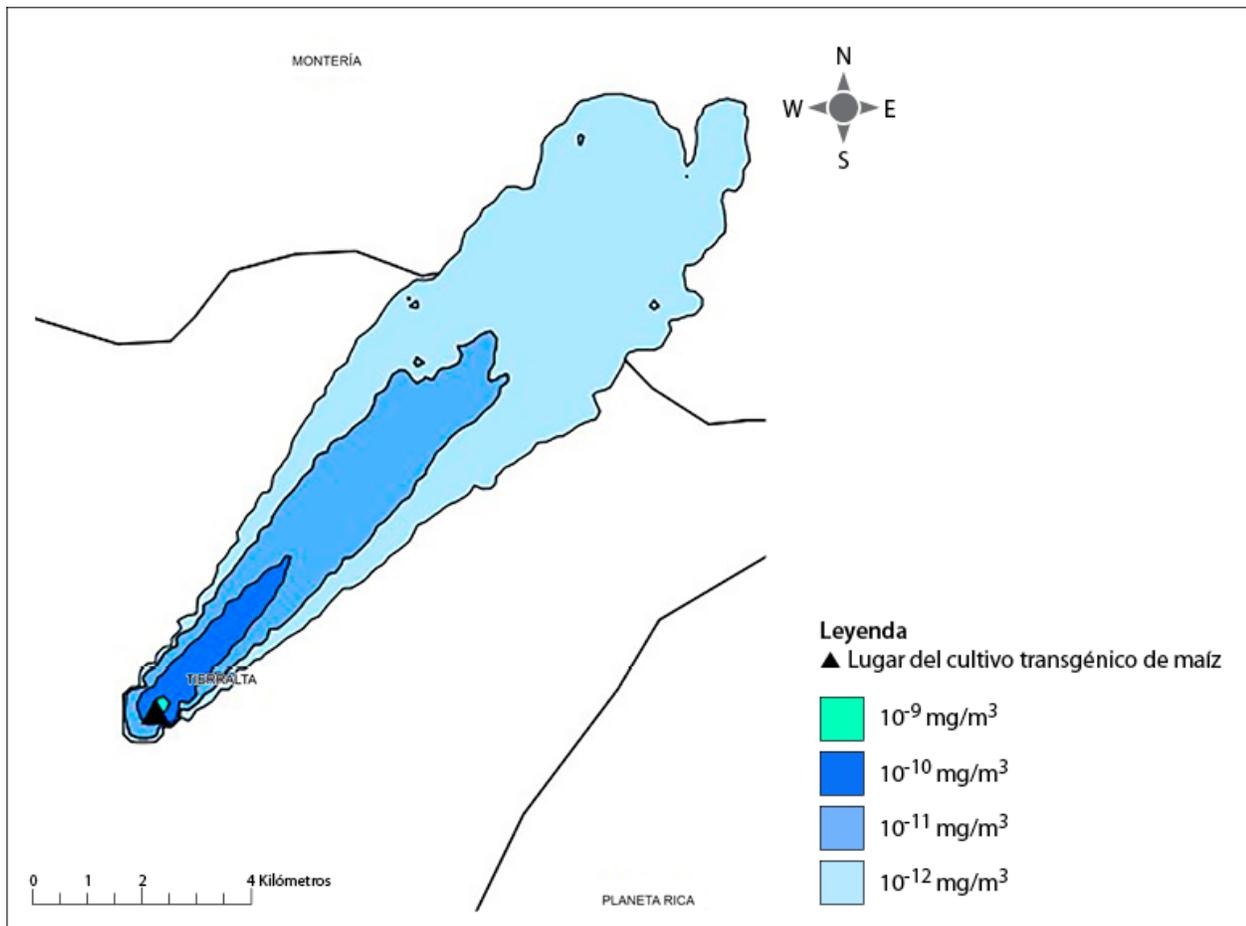
**Figura 5.** Simulación n.º 4, que representa la distancia cercana a la media alcanzada por el polen de maíz en abril. Día de la simulación: 20/04/2016. Fuente: Elaboración propia



**Figura 6.** Simulación n.º 5, que representa la distancia cercana a la media alcanzada por el polen de maíz en mayo. Día de la simulación: 10/05/2016. Fuente: Elaboración propia



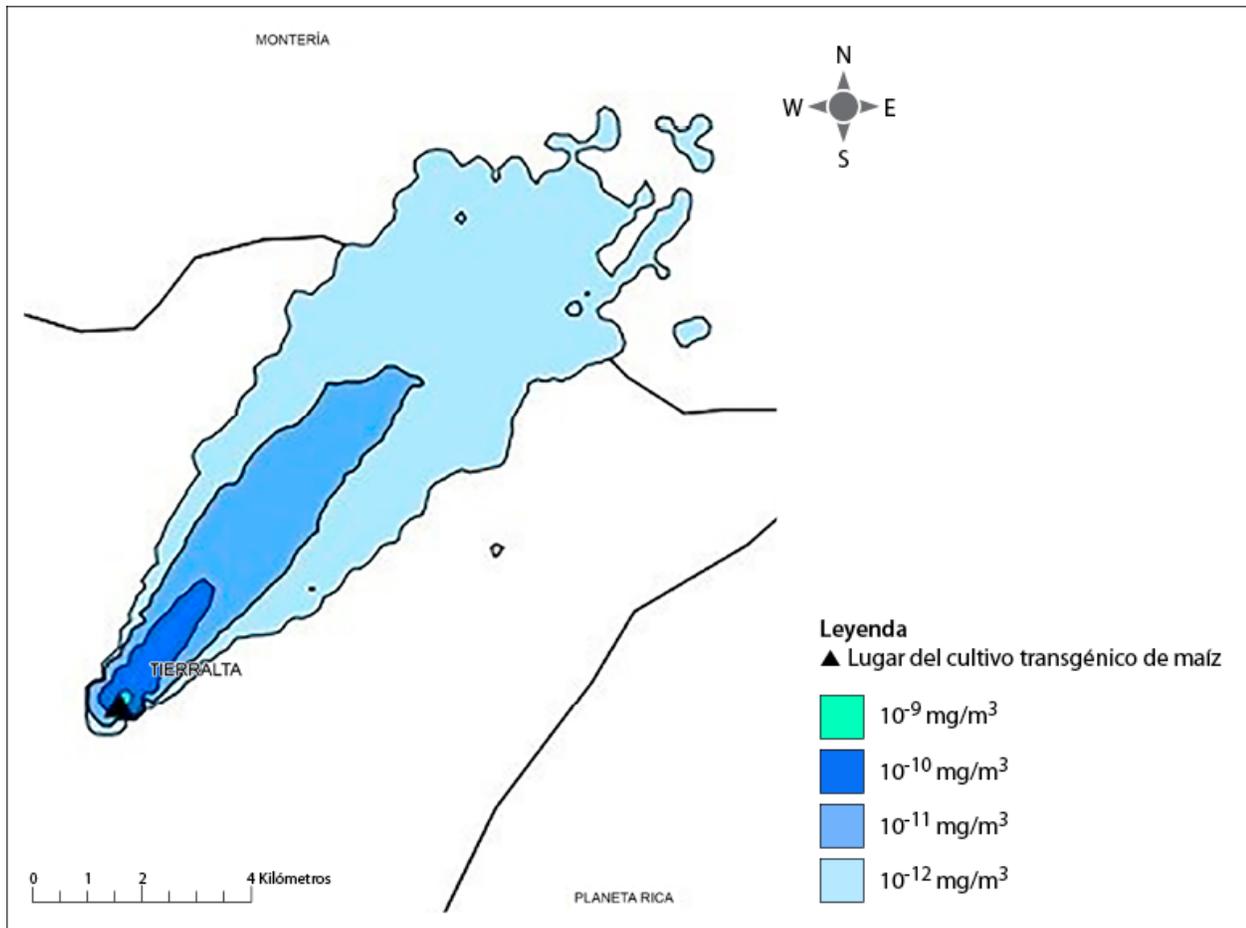
**Figura 7.** Simulación n.º 6, que representa la distancia cercana a la media alcanzada por el polen de maíz en junio. Día de la simulación: 03/06/2016. Fuente: Elaboración propia



**Figura 8.** Simulación n.º 7, que representa la distancia cercana a la media alcanzada por el polen de maíz en julio.

Día de la simulación: 22/07/2016.

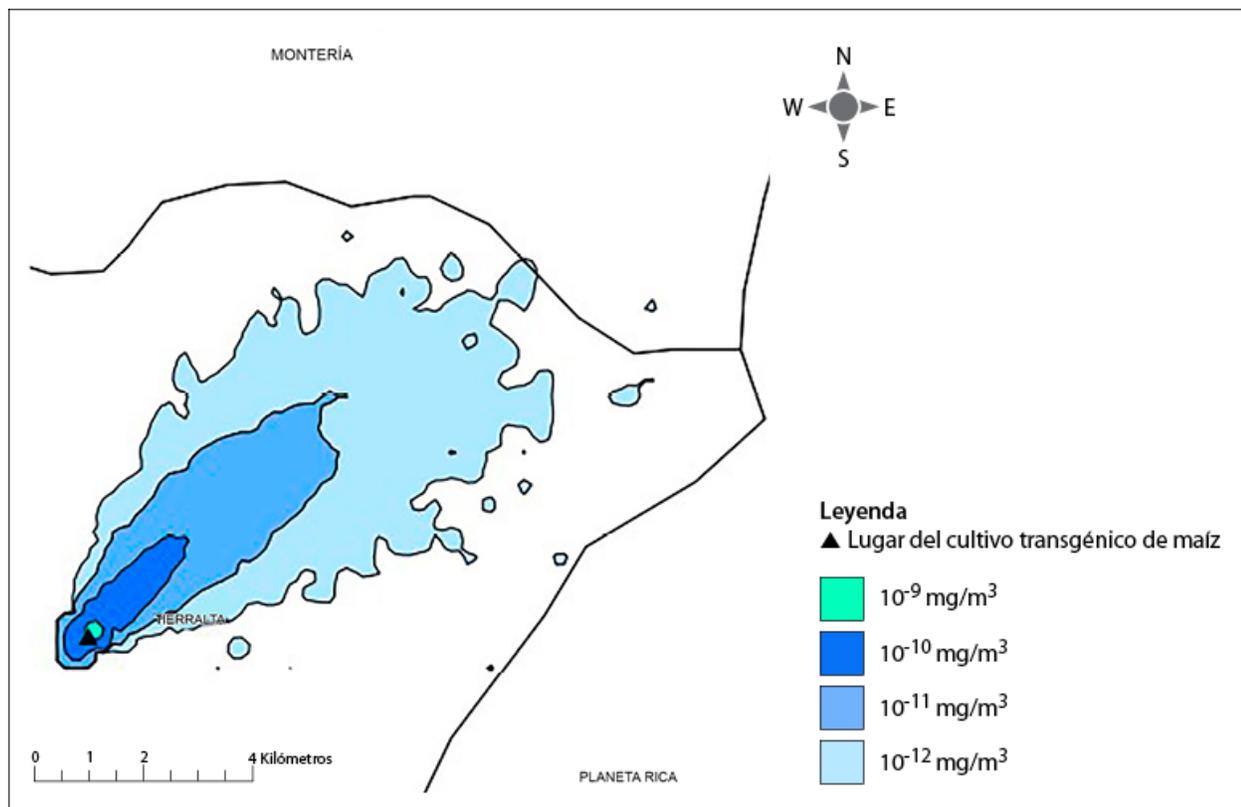
Fuente: Elaboración propia



**Figura 9.** Simulación n.º 8, que representa la distancia cercana a la media alcanzada por el polen de maíz en agosto.

Día de la simulación: 15/08/2016.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 10.** Simulación n.º 9, que representa la distancia cercana a la media alcanzada por el polen de maíz en septiembre. Día de la simulación: 02/09/2016.

Fuente: Elaboración propia

Los mapas muestran las diferentes áreas afectadas por la dispersión del polen: este-sureste, con predominio de la dirección noreste. Con los mapas de cada día de estudio, se elaboró la tabla 3, que indica el promedio mensual de la distancia recorrida por las partículas de polen de maíz desde la fuente para una concentración en masa de  $10^{-9} \text{mg/m}^3$ .

Es importante resaltar que para este trabajo se distinguió entre la velocidad de sedimentación, que corresponde a una característica de la partícula, y la velocidad de deposición, que tiene en cuenta fenómenos de turbulencia, dirección y velocidad del viento (Sportisse, 2010). Así, no es de esperarse que durante los días en que la velocidad de sedimentación fue más alta, la distancia que recorrían las partículas fuera menor, ya que la deposición del polen depende también de la fuerza y la dirección de los flujos de la masa de aire en un día específico. Por consiguiente, para el análisis de los resultados no se estableció correlación alguna entre la distancia alcanzada por la partícula y su velocidad de sedimentación.

**Tabla 3.** Promedio mensual de la distancia recorrida por las partículas de polen de maíz desde la fuente para una concentración en masa de  $10^{-9}$  mg/m<sup>3</sup>

Mes	Distancia (m)
Enero	502
Febrero	490
Marzo	474
Abril	617
Mayo	799
Junio	574
Julio	483
Agosto	541
Septiembre	502

Fuente: Elaboración propia

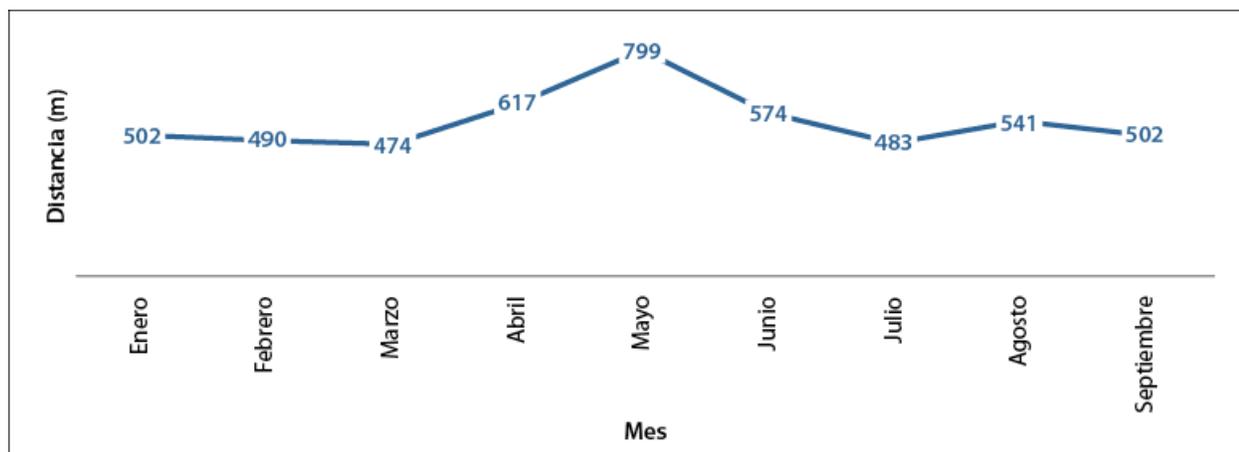
Fonseca y Westgate (2005) recomiendan que, para el recorrido advectivo, el estudio del polen sea menor a 1 km si se realiza solo con información meteorológica. A mayores distancias puede ser inexacto, ya que al entrar en la capa límite, viaja más. Asimismo, Viner y Arritt (2010) aconsejan que, si se usa información meteorológica solo en la fuente, lo más apropiado es hacer estudios de corta distancia, pues si el polen atraviesa la capa límite, esta información meteorológica no podría extrapolarse. Por su parte, Chaparro-Giraldo et al. (2015) no registraron viaje del polen transgénico más allá de 500 m de distancia en el departamento de Tolima. Por tal motivo, aunque el modelo registra mayores distancias a 1 km, solo se mostrará lo que sucede a menores distancias, debido a que el modelo no contempla los parámetros de viabilidad del polen ni el ingreso de los granos en la capa límite según la variable ingresada en la sección “distancia vertical”.

La tabla 4 presenta los valores promedio y mínimo anual de la distancia recorrida por las partículas de polen de maíz desde la fuente para una concentración de polen en masa de  $10^{-9}$  mg/m<sup>3</sup>. Posteriormente, en la figura 11 se ilustra el promedio mensual.

**Tabla 4.** Mínimo y promedio anual de la distancia recorrida por las partículas de polen de maíz desde la fuente para una concentración de polen en masa de  $10^{-9}$  mg/m<sup>3</sup>

Valor	Distancia (m)
Mínimo	20
Promedio	584

Fuente: Elaboración propia



**Figura 11.** Promedio mensual de la distancia recorrida por las partículas de polen de maíz desde la fuente para una concentración de polen en masa de  $10^{-9}$  mg/m<sup>3</sup>.

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse, el promedio anual de la distancia recorrida fue de 584 m, el mínimo de 20 m y el máximo de 1.000 m en todos los meses. La mayor distancia promedio se registró en el mes de mayo con un valor de 799 m y la menor en marzo, con 474 m. Esto puede deberse a que en mayo la velocidad del viento promedio multianual es de 3 km/h, un valor alto con respecto a otros meses. Sin embargo, con base en la información meteorológica de otros años y considerando que mayo es el mes con las mayores precipitaciones y la humedad relativa más alta (60 % en promedio) (Weather Spark, 2017), puede inferirse que la concentración polínica de maíz en el aire disminuye y, por ende, su dispersión por aire también (Asmae et al., 2017).

Aunque las mayores velocidades multianuales del viento se registran en los meses de marzo y abril con valores entre 2,5-3,5 km/h, en el primer semestre de 2016 el fenómeno de El Niño estaba en su última etapa, lo que ocasionó que los vientos de la superficie se debilitaran desde enero hasta abril de ese año (Ideam, 2016). Por ello, si bien se esperaba una mayor distancia recorrida en los primeros meses del año, se registraron distancias cortas y, a partir de mayo, la tendencia del recorrido del polen se ajustó a la tendencia de la velocidad del viento en el resto del año. En caso de presentarse el fenómeno de La Niña, aumentarían considerablemente las precipitaciones en las regiones Andina, Pacífico y Caribe y se fortalecerían los vientos del este en el Pacífico tropical, según el registro de este fenómeno en los años 2010 y 2011 en Colombia (Euscátegui & Hurtado, 2011).

Las distancias máximas se obtuvieron en enero y entre abril y junio, lo cual puede explicarse porque en 2016 la máxima velocidad del viento y, por tanto, la mayor fuerza del viento, según su relación cuadrática entre la velocidad y la fuerza, se alcanzaron a partir del segundo trimestre (abril y mayo), cuando el fenómeno de El Niño estaba en su etapa final, con un rango entre 2-3 km/h y una dirección del viento proveniente del oeste (Weather Spark, 2017).

Dado que el modelo fue aplicado por un periodo de dos horas, que es el rango de tiempo en el que la partícula de polen pierde el 100 % de viabilidad (Fonseca & Westgate, 2005), es muy poco probable que

estas partículas de polen alcancen distancias tan largas si su velocidad de sedimentación es relativamente alta con respecto a otro material particulado. Y si alcanzaran distancias mayores a 1 km, la probabilidad de transferencia genética es baja debido a la disminución de la viabilidad en sus dos horas de viaje.

La dispersión del polen de maíz es una variable difícil de predecir porque depende de unas condiciones ambientales que difieren según el lugar y la época. Esto significa que la teoría y el modelo aplicados en cierto lugar deben ser cuidadosamente reproducidos debido a las diferencias geográficas.

## Conclusiones y recomendaciones

Con estos resultados es posible concluir que, para el área de estudio y las simulaciones realizadas, en los primeros meses del año es mayor la distancia que alcanzan las partículas de polen de maíz por la dispersión, dado que se presentan condiciones climáticas favorables como baja precipitación, altas temperaturas, fuertes vientos y baja humedad relativa. Sin embargo, no se debe subestimar la dispersión en otras épocas del año.

Asimismo, la dirección predominante de los vientos es del suroeste al noreste. Por lo tanto, se puede agendar fechas y establecer lugares especiales para el cultivo de transgénicos que garanticen la no contaminación por polen de los campos de maíz criollo. No obstante, esta medida no contempla la dispersión por la acción de polinizadores, que pueden transportar semillas a 50 m de distancia si son frugívoros (Franco-Quimbay & Rojas-Robles, 2015) y esparcir polen hasta 1.500 m si son nectarívoros (Vásquez et al., 2006). Esta solución tampoco responde a los desafíos sociales y económicos que se derivan de la siembra de OGM, así que se propone como último recurso. Se debe considerar que el cambio climático y sus efectos en las precipitaciones y la temperatura (Mayorga et al., 2011) generan mayor incertidumbre sobre el desplazamiento de las partículas de polen transgénico.

Se recomienda hacer un análisis riguroso de las diferentes fuentes de la información. En este trabajo los datos sobre los cultivos en Colombia se recolectaron de diferentes autores, pero las diferencias entre estos dificultaron el desarrollo del estudio, por lo que se decidió usar la información de las entidades gubernamentales. Para las investigaciones que requieran información meteorológica, se recomienda usar la base de datos del Ideam; si no se cuenta con algunos parámetros, se pueden usar bases internacionales.

Para futuros estudios con modelos de polen en el aire, se recomienda hacer una validación posterior en campo con el fin de obtener resultados más confiables. Aunque en este trabajo no se realizó dicha calibración, los resultados podrían usarse para investigaciones futuras en las que se recolecten muestras de polen y se verifique si corresponden al polen transgénico de maíz del lote de estudio.

Existe una discrepancia en las teorías sobre la distancia que recorren las partículas de polen. Los resultados obtenidos por Hofmann et al. (2014) en Alemania, Bélgica y Suiza con estudios de larga duración para definir el desplazamiento no pueden extrapolarse a Colombia por las diferencias climáticas. Por ello, se recomienda realizar más estudios sobre la distancia que recorren las esporas y el polen en la atmósfera para lograr un indicio sobre su trayecto, su potencial efecto en cultivos criollos y sus repercusiones en otros aspectos socioambientales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Ricardo Morales Betancourt de la Universidad de los Andes, por su asesoría en la construcción y elaboración del modelo; al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), y a la Organización Nacional Indígena de Colombia (ONIC).

## Descargos de responsabilidad

Los autores declaran que no existen conflictos de interés y que no se requirió ninguna fuente de financiación.

## Referencias

- Aira, M., Almaguer, M., Fernández-González, M., & Rodríguez-Rajo, J. (2018). Pollen diversity in the atmosphere of Havana, Cuba. *Aerobiologia*, 34, 389-403. <https://doi.org/10.1007/s10453-018-9521-y>
- Arrázola, F. (2014, octubre 17). *Reflexión sobre los transgénicos*. Agronegocios e Industria de Alimentos. Universidad de los Andes. <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2014/10/17/reflexion-sobre-los-transgenicos/>
- Asmae, J., Bouziane, H., Trigo, M., Kadiri, M., & Kazzaz, M. (2017). Poaceae pollen in the atmosphere of Tetouan (NW Morocco): effect of meteorological parameters and forecast of daily pollen concentration. *Aerobiologia*, 33, 517-528. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9487-1>
- Aylor, D., Boehm, M., & Shields, E. (2006). Quantifying aerial concentrations of maize pollen in the atmospheric surface layer using remote-piloted airplanes and lagrangian stochastic modeling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(7), 1003-1015. <https://doi.org/10.1175/JAM2381.1>
- Baltazar, B., Castro, L., Espinoza, A., De la Fuente, M., Garzón, J., González, J., Gutiérrez, M., Guzmán, J., Heredia, O., Horak, M., Madueño, J., Schapaugh, A., Stojšin, D., Uribe, H., & Zavala, F. (2015). Pollen-mediated gene flow in maize: Implications for isolation requirements and coexistence in Mexico, the center of origin of maize. *PLoS ONE*, 10(7), e0131549. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0131549>
- Blanco, J. (2012). *Monitoreo de flujo de genes de cultivos transgénicos de maíz a razas locales y variedades comerciales de maíz en el Valle de San Juan, Tolima* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. <http://www.bdigital.unal.edu.co/11337/1/790716.2012.pdf>
- Bunderson, L., & Levetin, E. (2014). Hygroscopic weight gain of pollen grains from *Juniperus* species. *International Journal of Biometeorology*, 59(5), 533-540. <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-014-0866-9>
- Chamecki, M., Gleicher, S., Dufault, N., & Isard, S. (2011). Diurnal variation in settling velocity of pollen released from maize and consequences for atmospheric dispersion and cross-pollination. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(8), 1055-1065. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.03.009>
- Chaparro, A. (2009). La selección natural y los cultivos transgénicos: ¿un hiato darwinista? *Acta Biológica Colombiana*, 14(4S), 365-382. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/10958/21274>
- Chaparro-Giraldo, A., Blanco, J., & López-Pazos, S. (2015). Evidence of gene flow between transgenic and non-transgenic maize in Colombia. *Agronomía Colombiana*, 33(3), 297-304. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v33n3.51501>
- Corazza, A., Chiapetti, R., Fogaça, L., Muller, A., Borghetti, G., & Dall'óglgio, E. (2016). Viability of maize pollen grains *in vitro* collected at different times of the day. *African Journal of Agricultural Research*, 11(12), 1040-1047. <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2015.10181>

- Corporación Grupo Semillas. (2017). *La situación de los transgénicos y los derechos humanos en pueblos indígenas de Colombia. Informe paralelo al Sexto Informe Estatual de la República de Colombia sobre la realización del Pacto Internacional sobre Derechos Económicos, Sociales y Culturales de los pueblos indígenas*. <https://bit.ly/3j3phq2>
- Draxler, R. (s. f.). *Can HYSPLIT be setup to run a short-range dispersion calculation? If so, how?* National Oceanic and Atmospheric Administration. Consultado septiembre 1, 2019, en <https://bit.ly/3gp0BXd>
- Euscátegui, C., & Hurtado, G. (2011). *Análisis del impacto del fenómeno de "La Niña" 2010-2011 en la hidroclimatología del país*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://bit.ly/31r8sPC>
- Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya. (2018, junio 22). Cultivo de maíz en Colombia. Agroinsumos SAS. <http://www.agroinsumos.com/cultivo-del-maiz-en-colombia/>
- Fonseca, A., & Westgate, M. (2005). Relationship between desiccation and viability of maize pollen. *Field Crops Research*, 94(2-3), 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.12.001>
- Franco-Quimbay, J., & Rojas-Robles, R. (2015). Frugivoría y dispersión de semillas de la palma *Oenocarpus bataua* en dos regiones con diferente estado de conservación. *Actualidades Biológicas*, 37(102), 33-45. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/actbio/article/view/329005>
- Gómez, J., & Cadena, M. (2017). *Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) para Colombia*. Nota técnica IDEAM-METEO/002-2018. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://bit.ly/2QLXFB>
- Henry, C., Morgan, D., Weekes, R., Daniels, R., & Boffey, C. (2003). *Farm scale evaluations of GM crops: monitoring gene flow from GM crops to non-GM equivalent crops in the vicinity (contract reference EPG 1/5/138). Part I. Forage maize. Final Report, 2000/2003*. Department for Environment, Food and Rural Affairs. [http://science.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=CB02005\\_2739\\_FRP.pdf](http://science.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=CB02005_2739_FRP.pdf)
- Hofmann, F., Otto, M., & Wosniok, W. (2014). Maize pollen deposition in relation to distance from the nearest pollen source under common cultivation - Results of 10 years of monitoring (2001 to 2010). *Environmental Science Europe*, 26, 24. <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0024-3>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam]. (2016). *Boletín informativo sobre el monitoreo de los fenómenos de variabilidad climática "El Niño" y "La Niña"* [Boletín n.º 92]. <https://bit.ly/2QowHaW>
- LMNO Engineering, Research and Software. (s. f.). *Calculators*. Consultado septiembre 1, 2019, en <https://www.lmnoeng.com/>
- Ma, J., Skibbe, D., Fernandes, J., & Walbot, V. (2008). Male reproductive development: gene expression profiling of maize anther and pollen ontogeny. *Genome Biology*, 9, R181. <https://doi.org/10.1186/gb-2008-9-12-r181>
- Marceau, A., Loubet, B., Andrieu, B., Durand, B., Foueillassar, X., & Huber, L. (2011). Modelling diurnal and seasonal patterns of maize pollen emission in relation to meteorological factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(1), 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.012>
- Martin, M., Chamecki, M., & Brush, G. (2010). Anthesis synchronization and floral morphology determine diurnal patterns of ragweed pollen dispersal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(9), 1307-1317. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.06.001>
- Mayorga, R., Hurtado, G., & Benavides, H. (2011). *Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística*. Nota técnica IDEAM-METEO/001-2011. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://bit.ly/34uz04I>
- Ministerio de Agricultura. (s. f.). *Estadísticas agropecuarias*. Agronet. Consultado septiembre 1, 2019, en <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (s. f.). *Air Resources Laboratory*. U. S. Department of Commerce. Consultado septiembre 1, 2019, en <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015, mayo 22). *El crecimiento verde coloca la agricultura en el centro del desarrollo sostenible*. <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/news/detail-news/es/c/288157/>
- Ospina, J. (2015). *Manual técnico del cultivo de maíz bajo buenas prácticas agrícolas*. Gobernación de Antioquia.
- Pasquet, R., Peltier, A., Hufford, M., Oudin, E., Saulnier, J., Paul, L., Knudsen, J., Herren, H., & Gepts, P. (2008). Long-distance pollen flow assessment through evaluation of pollinator foraging range suggests transgene escape distances. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(36), 13456-13461. <https://doi.org/10.1073/pnas.0806040105>
- Peterson, J., Lundgren, J., & Harwood, J. (2011). Interactions of transgenic *Bacillus thuringiensis* insecticidal crops with spiders (Araneae). *The Journal of Arachnology*, 39(1), 1-21. <https://doi.org/10.1636/M10-98.1>
- Portafolio. (2018, mayo 6). *Al maíz le buscan tierra para crecer*. <https://www.portafolio.co/economia/al-maiz-le-buscan-tierra-para-crecer-516857>
- Red Semillas Libres de Colombia, & Grupo Semillas. (2015). *Las semillas patrimonio de los pueblos en manos de los agricultores. Acciones sociales para enfrentar el colonialismo corporativo de las semillas en Colombia*. <https://bit.ly/31sgliF>
- Resolución 946 de 2006. "Por la cual se establece el procedimiento para el trámite ante el ICA de solicitudes de Organismos Vivos Modificados, OVM; se aprueba el Reglamento Interno del Comité Técnico Nacional de Bioseguridad, CTNBio para OVM con fines exclusivamente agrícolas, pecuarios, pesqueros, plantaciones forestales comerciales y agroindustria, y se dictan otras disposiciones". Instituto Colombiano Agropecuario. <https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2006/946.aspx>
- Reyes, G., Chaparro-Giraldo, A., & Ávila, K. (2010). Efecto ambiental de agroquímicos y maquinaria agrícola en cultivos transgénicos y convencionales de algodón. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12(2), 151-162. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/18556/19952>
- Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. (2008). *La biodiversidad y la agricultura. Salvaguardando la biodiversidad y asegurando alimentación para el mundo*. <https://www.cbd.int/doc/bioday/2008/ibd-2008-booklet-es.pdf>
- Semillas de Identidad. (2018, marzo 2). Mapa maíz transgénico en Colombia 2015. *Semillas de Identidad*. <http://semillasdeidentidad.blogspot.com/2018/03/mapa-maiz-transgenico-en-colombia-2015.html>
- Sicard, T. (2000). Los cultivos transgénicos en el contexto de una agricultura sostenible. En T. Sicard (Coord.), *Seminario Cultivos Transgénicos: implicaciones ambientales en Colombia* (pp. 7-23). Universidad Nacional de Colombia. <https://bit.ly/2EmrspW>
- Sportisse, B. (2010). Atmospheric boundary layer. En *Fundamentals in air pollution* (pp. 93-132). [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2970-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2970-6_4)
- Vásquez, R., Ballesteros, H., Muñoz, C., & Cuéllar, M. (2006). *Utilización de la abeja Apis mellifera como agente polinizador en cultivos comerciales de fresa (Fragaria chiloensis) y mora (Rubus glaucus) y su efecto en la producción*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12812>
- Vélez, G. (2015). *Los cultivos de maíz y algodón en Colombia. Impactos sobre la biodiversidad y la soberanía alimentaria*. Red de Semillas Libres. <https://www.redsemillaslibres.co/files/Art.OGMColumbia.Rev.Inv.yciencia.final.jun.7.11.pdf>
- Viner, B., & Arritt, R. (2010). Increased pollen viability resulting from transport to the upper boundary layer. *Field Crops Research*, 119(1), 195-200. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.008>
- Viner, B., Westgate, M., & Arritt, R. (2010). A model to predict diurnal pollen shed in maize. *Crop Science*, 50(1), 235-245. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.11.0670>
- Weather Spark. (2017). *El clima promedio en Tierralta, Colombia*. <https://bit.ly/3aTzrqb>