TESIS DE DOCTORADO

LA IDENTIDAD CULTURAL DEL CULTIVO DE MAÍZ EN MÉXICO: IMPORTANCIA Y RETOS ANTE LA APERTURA COMERCIAL DE TRANSGÉNICOS

Alberto Santillán Fernández

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS Y MEDIOAMBIENTALES

LUGO

AÑO 2021

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

DECLARACIÓN DEL AUTOR / A DE LA TESIS

D. Dña. **Alberto Santillán Fernández**

Titulo da tese: **LA IDENTIDAD CULTURAL DEL CULTIVO DE MAÍZ EN MÉXICO: IMPORTANCIA Y RETOS ANTE LA APERTURA COMERCIAL DE TRANSGÉNICOS**

Presento mi tesis, siguiendo el procedimiento adecuado al Reglamento y declaro que:

1) La tesis abarca los resultados de la elaboración de mi trabajo.
2) De ser el caso, en la tesis se hace referencia a las colaboraciones que tuvo este trabajo.
3) Confirmo que la tesis no incurre en ningún tipo de plagio de otros autores ni de trabajos presentados por mí para la obtención de otros títulos.
4) La tesis es la versión definitiva presentada para su defensa y coincide la versión impresa con la presentada en formato electrónico.

Y me comprometo a presentar el Compromiso Documental de Supervisión en el caso que el original no esté depositado en la Escuela.

En **Lugo, España, 20 de julio de 2021**.

Firma electrónica

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR / TUTOR DE LA TESIS

LA IDENTIDAD CULTURAL DEL CULTIVO DE MAÍZ EN MÉXICO: IMPORTANCIA Y RETOS ANTE LA APERTURA COMERCIAL DE TRANSGÉNICOS

D./Dª. **Santiago Pereira Lorenzo**.
D./Dª. **Yolanda Salinas Moreno**
D./Dª. **José René Valdez Lazalde**

INFORMA/N:

Que la presente tesis, se corresponde con el trabajo realizado por D/Dª. **Alberto Santillán Fernández**, bajo mi dirección/tutorización, y autorizo su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como director de esta no incurre en las causas de abstención establecidas en la Ley 40/2015.

De acuerdo con lo indicado en el Reglamento de Estudios de Doctorado, declara también que la presente tesis doctoral es idónea para ser defendida en base a la modalidad de **Monográfica con reproducción de publicaciones**, en los que la participación del doctorando/a fue decisiva para su elaboración y las publicaciones se ajustan al Plan de Investigación.

En Lugo, España a **20 de julio de 2021**

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

DEDICATORIA

A mis grandes amores Keren, Regina, Fernando, Thiago y Santhiago.

A mis padres: Flor y Fernando.

A mis padrinos: Francisco y Guadalupe.

A mis hermanos: Esmeralda, Margarita y Fernando.

A mis abuelos: Jesús y Angélica.

A todos mis tíos, primos y sobrinos.

A mis compadres: Francisco y Samuel, porque nuestra amistad sea interminable.

Alberto

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

AGRADECIMIENTOS

A quien me acompaña, guía y cuida en todo momento y hace posible realizar mis sueños, a Dios nuestro señor.

A la Universidad de Santiago de Compostela, por darme la oportunidad de realizar mis estudios doctorales.

Un especial agradecimiento al Dr. Santiago Pereira Lorenzo y Dr. Agustín Merino García; por creer en mí aun cuando yo mismo no creía en mis capacidades, por compartirme mucha de su sabiduría y porque constantemente me hacen recordar hacia donde voy.

A la Dra. Yolanda Salinas Moreno y Dr. José René Valdez Lazalde por su invaluable asesoramiento en la realización del presente trabajo.

Al Dr. Jaime Bautista Ortega por su amistad, por compartirme sus conocimientos y por su espíritu de apoyo que hacen más agradable el trabajo.

A mis compañeros y amigos del Colpos-Campeche, USC, ITSVC y MTB. Muchas gracias por su amistad y apoyo.

Alberto

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

RESUMEN

El trabajo de Tesis Doctoral, **La identidad cultural del cultivo de maíz en México: importancia y retos ante la apertura comercial de transgénicos,** se basa en la aplicación de técnicas bibliométricas, análisis de productividad agrícola y herramientas de sistemas de información geográfica, orientadas a delimitar áreas con alta diversidad de razas de maíz nativas y asociar su cultivo con la riqueza etnográfica de las regiones, con el objetivo de establecer regiones prioritarias de conservación *in situ* de razas de maíz nativas donde se restrinja el cultivo de variedades transgénicas.

La Tesis Doctoral se estructura en tres capítulos. En el primer capítulo se analiza la publicación de artículos científicos sobre el tema de maíz genéticamente modificado (OGM) a nivel mundial. En el segundo capítulo se analiza la producción de maíz grano en México de 1983 a 2018 y se asocia con indicadores de adopción de maíz OGM en las principales regiones productoras de México. Finalmente, en el tercer capítulo se asocia la riqueza genética de las razas de maíz nativas con los grupos étnicos en México y se describen las relaciones etnoculturales del maíz con la población indígena.

Los resultados indican que en México no se produjo una especialización en el tema de maíz genéticamente modificado (OGM), sino que los investigadores respondieron a políticas agrarias del momento, las mismas que han priorizado el uso intensivo de insumos y semillas mejoradas. Sin embargo, en el centro y sur del país no se han logrado los cambios tecnológicos esperados; ha sido más fuerte la tradición ancestral en el cultivo, asociada a la mayor variedad de razas de maíz nativas y a una mayor población indígena; y fue precisamente del centro al sur de México donde se encontró la mayor diversidad de usos y razas de maíz nativas, con una elevada correlación entre el índice de usos del maíz (grano y planta) y la presencia de grupos étnicos, debido a la necesidad de estas etnias de cultivar razas específicas según el producto final deseado. Las regiones de producción en secano mostraron los mayores descensos en productividad y los niveles más bajos de adopción de variedades transgénicas, la razón principal que expusieron los productores es que el incremento en los rendimientos de campo no es económicamente rentable respecto al incremento en los costos de producción, por lo que los productores prefieren el cultivo de variedades nativas.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Palabras clave: Análisis bibliométrico, agricultura de secano, razas de maíz, sistemas de información geográfico.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

RESUMO

O traballo de Tese de Doutoramento, **A identidade cultural do cultivo de millo en México: importancia e retos antes da apertura comercial de transxénicos**, baséase na aplicación de técnicas bibliométricas, análise da produtividade agrícola e ferramentas de sistemas de información xeográfica, destinadas a delimitar áreas con alta diversidade de razas autóctonas de millo e asociar o seu cultivo á riqueza etnográfica das rexións, co obxectivo de establecer rexións prioritarias para a conservación in situ das variedades autóctonas de millo onde o cultivo de variedades transxénicas está restrinxido.

A Tese Doutoral estrutúrase en tres capítulos. O primeiro capítulo analiza a publicación de artigos científicos sobre o tema do millo xenéticamente modificado (OMX) en todo o mundo. O segundo capítulo analiza a produción de millo de grans en México desde 1983 ata 2018 e está asociado a indicadores de adopción de millo transxénico nas principais rexións produtoras de México. Finalmente, no terceiro capítulo, a riqueza xenética das razas autóctonas de millo está asociada a grupos étnicos en México e descríbense as relacións etnoculturais do millo coa poboación indíxena.

Os resultados indican que en México non houbo especialización no tema do millo xeneticamente modificado (OXM), pero que os investigadores responderon ás políticas agrícolas do momento, que priorizaron o uso intensivo de insumos e as sementes melloradas. Non obstante, no centro e sur do país non se conseguiron os cambios tecnolóxicos esperados; A tradición ancestral no cultivo foi máis forte, asociada á maior variedade de razas de millo autóctonas e a unha maior poboación indíxena; e foi precisamente dende o centro ata o sur do país onde se atopou a maior diversidade de usos e razas do millo autóctono, cunha alta correlación entre o índice de usos do millo (gran e planta) e a presenza de grupos étnicos, debido á necesidade destas etnias de cultivar razas específicas segundo o produto final desexado. As rexións de produción en condicións de secaño mostraron os maiores descensos na produtividade e os niveis máis baixos de adopción de variedades transxénicas; o principal motivo diso exposto polos produtores é o aumento dos custos de produción, razón pola cal os produtores prefiren o cultivo de variedades autóctonas

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Palabras chave: Análise bibliométrica, agricultura de secaño, razas de millo, sistemas de información xeográfica.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ABSTRACT

The Doctoral Thesis, **The cultural identity of corn cultivation in México: Importance and challenges before the commercial opening of transgenics**, is based on the application of bibliometric techniques, analysis of agricultural productivity and tools of geographic information systems, aimed at delimiting areas with high diversity of native maize races and associate their cultivation with the ethnographic wealth of the regions with the aim of establishing priority regions for *in situ* conservation of native maize varieties where the cultivation of transgenic varieties is restricted.

The Doctoral Thesis is structured in three chapters. The first chapter analyzes the publication of scientific articles on the subject of genetically modified corn (GMO) worldwide. The second chapter analyzes grain corn production in México from 1983 to 2018 and is associated with indicators of the adoption of GMO corn in the main producing regions of Mexico. Finally, in the third chapter, the genetic richness of native maize races is associated with ethnic groups in Mexico and the ethnocultural relationships of maize with the indigenous population are described.

The results indicate that in Mexico there was no specialization in the subject of genetically modified corn (GMO), but that the researchers responded to agricultural policies of the moment, which have prioritized the intensive use of inputs and improved seeds. However, in the center and south of the country the expected technological changes have not been achieved; the ancestral tradition in cultivation has been stronger, associated with the greater variety of native maize races and a larger indigenous population; and it was precisely from the center to the south of the country where the greatest diversity of uses and races of native corn was found, with a high correlation between the index of uses of corn (grain and plant) and the presence of ethnic groups, due to the need of these ethnicities to cultivate specific races according to the desired end product. The production regions under rainfed conditions showed the greatest decreases in productivity and the lowest levels of adoption of transgenic varieties; the main reason for this exposed by producers is the increase in production costs, which is why producers prefer the cultivation of native varieties.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Keywords: Bibliometric analysis, rainfed agriculture, maize races, geographic information systems

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ÍNDICE

INDICE I

LISTA DE TABLAS V

LISTA DE FIGURAS IX

RESUMEN EXTENSO 1

1. INTRODUCCIÓN 3

2. OBJETIVOS 9

3. CAPÍTULO I. EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA SOBRE MAÍZ GENÉTICAMENTE MODIFICADO A NIVEL MUNDIAL 13

3.1 RESUMEN 15

3.2 INTRODUCCIÓN 16

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS 18

3.3.1 Origen de la información y preparación de datos 18

3.3.2 Análisis con minería de textos 19

3.3.3 Análisis de redes 20

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 20

3.4.1 Producción científica sobre el tema de maíz OGM en el contexto internacional 20

3.4.2 Indicadores bibliométricos 25

3.4.3 Producción científica sobre el tema de maíz OGM en México 33

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

4. CAPÍTULO II. CAMBIOS ESTRUCTURALES EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ ENTRE 1983 Y 2018: PARADIGMAS EN LA ADOPCIÓN DE MAÍZ GENÉTICAMENTE MODIFICADO .. 41

4.1 RESUMEN 43

4.2 INTRODUCCIÓN 44

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS 47

4.3.1 Producción y consumo de maíz a nivel mundial 47

4.3.2 Producción y consumo de maíz en México 47

4.3.3 Productividad de maíz grano en México 47

4.3.4 Indicadores de adopción de maíz OGM 49

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 49

4.4.1 Producción y consumo de maíz grano a nivel mundial 49

4.4.2 Producción y consumo de maíz en México 51

4.4.3 Productividad de maíz grano en México 57

4.4.4 Indicadores de adopción de maíz OGM 64

5. CAPÍTULO III. DELIMITACIÓN ESPACIAL DE CENTROS DE DIVERSIDAD DE MAÍZ (Zea mays) EN MÉXICO 67

5.1 RESUMEN 69

5.2 INTRODUCCIÓN 70

5.3 MATERIALES Y MÉTODOS 72

5.3.1 Base de datos 72

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

5.3.2 Delimitación espacial de las regioness de riqueza genética por raza de maíz 73

5.3.3 Delimitación espacial de la diversidad intraespecífica de maíz 74

5.3.4 Delimitación espacial del centro de diversidad de maíz..... 75

5.3.5 Caracterización del centro de diversidad de maíz por factores climáticos..... 75

5.3.6 Relación de los centros de diversidad con los grupos étnicos y usos del maíz 76

5.4 RESULTADOS 79

5.4.1 Delimitación espacial de las regiones de riqueza genética por raza de maíz..... 79

5.4.2 Delimitación espacial de la diversidad intraespecífica de maíz 83

5.4.3 Delimitación espacial del centro de diversidad de maíz..... 85

5.4.4 Caracterización del centro de diversidad de maíz por factores climáticos..... 87

5.4.5 Relación de los centros de diversidad con los grupos étnicos y usos de maíz 88

5.5 DISCUSIÓN..... 96

5.5.1 Delimitación espacial de las regiones de riqueza genética por raza de maíz..... 96

5.5.2 Unidades ambientales..... 97

6. CONCLUSIONES GENERALES 101

7. ABREVIATURAS 105

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

8. CONTRIBUCIONES POR AUTOR 109
9. REFERENCIAS 113
10. ANEXOS 133

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores bibliométricos de las principales revistas que publicaron artículos científicos sobre maíz OGM a nivel mundial de 1991 a 2019, ordenadas de acuerdo al número de artículos publicados. 27

Tabla 2. Matriz que relaciona el porcentaje y la cantidad de artículos científicos publicados en revistas de los principales países con producción científica sobre maíz OGM de 1991 a 2019. 28

Tabla 3. Indicadores bibliométricos de los principales artículos científicos sobre maíz OGM a nivel mundial de 1991 a 2019, ordenados de acuerdo al número de citas bibliográficas 29

Tabla 4. Matriz que relaciona el porcentaje y la cantidad de artículos científicos publicados en revistas institucionales de los principales centros académicos y de investigación con producción científica sobre maíz OGM de 1991 a 2019 en México. 36

Tabla 5. Indicadores de las redes de coautoría para los periodos 2001-2006, 2007-2012 y 2013-2018 de los artículos científicos publicados sobre maíz OGM donde el primer autor es mexicano. 38

Tabla 6. Tipología para determinar el crecimiento en la producción de un sector agrícola en función de las variaciones porcentuales de la superficie sembrada y rendimientos en campo. 48

Tabla 7. Indicadores de campo y comercio de los principales países productores y consumidores de maíz grano a nivel mundial de 2007 a 2018. 52

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 8. Promedio de los indicadores de campo de la producción de maíz grano en México por ciclo de producción y régimen hídrico de 2013 a 2018. 55

Tabla 9. Prueba de medias por Tukey para los indicadores de campo de la producción de maíz grano en México de 1983-2018. 58

Tabla 10. Análisis de la productividad de maíz en México de 1983 a 2018 obtenido mediante el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción (Gómez-Oliver, 1994). 59

Tabla 11. Productividad de maíz grano por Estado de 2013-2018 respecto de 2007-2012 obtenida mediante el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción 62

Tabla 12. Caracterización socioeconómica de los productores en las principales regiones productoras de maíz en México de 1983 a 2018. 66

Tabla 13. Descripción de los principales usos del grano y planta de las 64 razas de maíz nativas cultivadas en México. 77

Tabla 14. Relación de las principales razas de maíz cultivadas en cada unidad ambiental con usos específicos de grano y planta, y los grupos étnicos asociados territorialmente a la distribución geográfica de las razas de maíz. 89

Tabla 15. Número de colectas, número de razas, número de razas principales, grupos étnicos e índice de usos del grano y planta de maíz al interior de cada unidad ambiental. 94

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 16. Coeficiente de correlación de Pearson que asocia la presencia de grupos étnicos en las unidades ambientales con el número de colectas, número de razas, número de razas principales, y el índice de usos del maíz (grano y planta). 96

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la investigación. La identidad cultural del cultivo de maíz en México: importancia y retos ante la apertura comercial de transgénicos. 7

Figura 2. Evolución temporal de la producción científica y citas bibliográficas en el tópico de maíz OGM a nivel mundial de 1991 a 2019 21

Figura 3. Relación espacial de la producción de artículos científicos en el tópico de maíz OGM con indicadores de productividad en campo de 1991 a 2019 (* millones de t, ** millones de ha) obtenidos de FAOSTAT (2020) 22

Figura 4. Principales naciones e investigación que abordan, según el país de origen del primer autor en los artículos científicos sobre maíz OGM de 1991 a 2019. 23

Figura 5. Red de autores y coautores a nivel mundial que han publicado artículos científicos sobre maíz OGM de 1991 a 2019. El tamaño del nodo corresponde con su productividad. La elipse identifica una sub-red formada por investigadores mexicanos. 25

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Figura 6. Distribución espacial de las instituciones académicas y de investigación en México que publicaron artículos sobre maíz OGM de 1991 a 2019, y principales áreas de producción. 34

Figura 7. Red de autores y coautores para el periodo 2001-2006 que publicaron artículos científicos sobre maíz OGM donde el primer autor es mexicano. 38

Figura 8. Red de autores y coautores para el periodo 2007-2012 que publicaron artículos científicos sobre maíz OGM donde el primer autor es mexicano 39

Figura 9. Red de autores y coautores para el periodo 2013-2018 que publicaron artículos científicos sobre maíz OGM donde el primer autor es mexicano. 39

Figura 10. Evolución temporal de la población mexicana y su relación con la producción, y consumo de maíz de 1983 a 2018 (TMCA, Tasa Media de Crecimiento Anual). 53

Figura 11. Evolución temporal de la superficie sembrada, rendimiento en campo y producción de maíz grano en México de 1983 a 2018, por ciclo de producción y régimen hídrico 56

Figura 12. Balance agroalimentario entre producción y consumo de maíz grano en México por región economica de 2013 a 2018. 57

Figura 13. Principales zonas productoras de maíz en México de 1983 a 2018 obtenidas de la suma de producción a nivel municipal en los ciclos primavera-verano y otoño-invierno. Los círculos indican las regiones donde se aplicaron encuestas a productores clave: Jalisco (45), Chiapas (33), Sinaloa (36) y Tamaulipas (27). 64

Figura 14. Distribución espacial de las razas de maíz en México y su pariente silvestre Teocinte. Entre paréntesis se indica el número de registros por raza 73

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Figura 15. Delimitación de regiones de riqueza para razas con más de 30 colectas. Ejemplo: Raza Cristalino de Chihuahua. a) Distribución geográfica de colectas. b) Región de riqueza genética obtenida mediante DivaGis. c) Región de riqueza genética que considera los cuatro intervalos de clase con mayor concentración de colectas (31 a 59, 60 a 89, 90 a 118 y 119 a 148). 80

Figura 16. Delimitación espacial de las zonas de amortiguamiento para cada colecta de las razas con menos de 30 registros. a) Distribución geográfica de las colectas de las razas con menos de 30 registros. b) Representación espacial de una zona de amortiguamiento de 5 km de radio. c) Representación espacial de las zonas de amortiguamiento de 5 km de radio para cada colecta de las razas con menos de 30 registros. 81

Figura 17. Representación espacial de las colectas de teocinte con las regiones de riqueza genética de las 49 razas con más de 30 colectas y zonas de amortiguamiento de 5 km de radio para las colectas de las 15 razas con menos de 30 registros 82

Figura 18. Región de riqueza genética para las 64 razas de maíz cultivadas en México. 82

Figura 19. Delimitación espacial de los índices de riqueza específica (A: Margalef y Menhinick) y los de estructura (B: Shannon, Brillouin y Simpson) para la distribución geográfica de las 64 razas de maíz cultivadas en México 84

Figura 20. Distribución espacial de las áreas comunes con diversidad intraespecífica de media a muy alta para las 64 razas de maíz cultivadas en México, de los índices de riqueza específica (Margalef y Menhinick) y los de estructura (Shannon, Brillouin y Simpson). 85

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Figura 21. Delimitación espacial de los centros de origen y domesticación del maíz establecidos por Kato *et al.* (2009) en el libro Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica 86

Figura 22. Delimitación espacial del centro de diversidad de maíz en México obtenido a partir de la unión de la región de riqueza genética de maíz, con la región de diversidad intraespecífica de maíz, y los centros de origen y domesticación del maíz establecidos para México..... 87

Figura 23. Delimitación espacial de las siete unidades ambientales que se diferenciaron al caracterizar del centro de diversidad de maíz en México por factores climáticos..... 88

Figura 24. Distribución espacial de las unidades ambientales y los grupos étnicos que existen en México. 93

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

RESUMEN EXTENSO

México es centro de origen del maíz y en su territorio se cultivan 64 razas nativas. El consumo per cápita anual es de aproximadamente 196 kg. Anualmente se producen alrededor de 23 millones de toneladas, los cuales son insuficientes frente a la demanda de 39 millones de toneladas que demanda una población en continuo aumento, con una tasa de crecimiento anual de 1 millón de personas. La política agrícola nacional se centra en incrementar la productividad por ha, incentivando el uso de maquinaria, fertilización y semillas mejoradas. Entre los programas fomentados se encuentra la adopción de semillas genéticamente modificadas (OGM). Sin embargo, al ser México el centro de origen del maíz, la diversidad de razas de maíz se puede ver comprometida. En virtud de ello, los objetivos de la presente investigación fueron relacionar la productividad de maíz grano en México entre 1983 y 2018 con la política agrícola nacional, determinar los factores que condicionan la adopción de maíz genéticamente modificado, y delimitar las regiones de diversidad de las razas de maíz nativas donde no se permita el uso de semillas OGM, para así garantizar su preservación al mismo tiempo que sus usos por las etnias del país.

Para ello primero se analizó la investigación científica desarrollada sobre el maíz OGM. El análisis con minería de textos y el análisis de redes mostró que la evolución espacio-temporal presentó un crecimiento lineal de 1991 a 2019, concentrándose principalmente en países de América, tales como México, USA, Colombia, Argentina y Brasil, que figuran entre los principales países productores de maíz grano a nivel mundial. Sin embargo, el impacto de las publicaciones (medida por el número de citas) para los países de America Latina fue casi nula, como resultado de la publicación en revistas editadas en español por los propios países. Para México se encontró una centralización de la investigación que se desfasa espacialmente de las áreas de producción, además de la endogamia académica que se

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

produce al publicar en revistas que edita la propia institución de los autores.

Respecto a los factores que condicionan la adopción de maíz OGM en las principales regiones productoras de maíz en México, se encontró que el tamaño de la parcela y el ingreso familiar que se obtiene de la actividad fueron los factores de mayor peso. Las regiones de producción en secano mostraron los mayores descensos en productividad y los niveles más bajos de adopción de variedades transgénicas. La razón principal que expusieron los productores fue que el incremento en los rendimientos de campo no fue económicamente rentable respecto al incremento en los costos de producción, por lo que los productores prefirieron el cultivo de variedades nativas.

Finalmente, mediante técnicas geográficas se determinaron centros de diversidad de maíz para establecer regiones donde no se permita el uso de semillas OGM que garanticen la preservación de la riqueza de razas de maíz y de sus usos. Se diferenciaron siete centros de diversidad que pueden considerarse áreas prioritarias para la conservación *in situ*. Los resultados también mostraron que existe una estrecha relación espacial entre la diversidad de razas de maíz y la de grupos étnicos, sobre todo desde el centro hacia el sur del país, produciéndose una diferenciación en los usos específicos del cultivo debido a las distintas tradiciones etno-culturales de los grupos indígenas, por lo que resultan imprescindibles para la conservación de las razas *in situ.* Por lo tanto, la política para incrementar la productividad de maíz en México se debe orientar hacia la protección de los agricultores a pequeña escala, mediante subsidios, asesoría técnica y programas de desarrollo rural, al ser un problema multidimensional de carácter espacial, temporal y cultural.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

1. INTRODUCCIÓN

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

1. INTRODUCCIÓN

México es considerado el centro de origen del maíz (Wellhausen *et al.*, 1952) y posee una gran diversidad de razas de maíz adaptadas a diferentes condiciones ambientales y sistemas agrícolas. El maíz crece en regiones con una precipitación anual entre 400 y 3000 mm, lo que le confiere características fenotípicas específicas como diferente altura de planta, tolerancia a calor, frío o sequía, y adaptación a diferentes tipos de suelo y altitud, desde el nivel del mar hasta los 3000 msnm (Ureta *et al.*, 2013).

En México existen 64 razas de maíz, lo que significa el 60% de la diversidad del maíz en el mundo (Ruiz-Corral *et al.*, 2008). La importancia del maíz para la población mexicana ha sido descrita ampliamente desde varios enfoques, como centro de origen (Matsuoka *et al.*, 2002), centro de domesticación (Piperno *et al.*, 2009; Hufford *et al.*, 2012), como base de la alimentación (Fernández-Suárez *et al.*, 2013), e incluso por las relaciones etno-culturales que han permitido el desarrollo de pueblos indígenas (Perales *et al.*, 2005; Ureta, 2013).

En México se cultivan aproximadamente 7 millones de ha de maíz grano, con rendimientos promedios de 3,33 t ha^{-1}, lo que significa una producción de 23 millones de t. Sin embargo, el consumo nacional es de alrededor de 39 millones de t que se solventa con la importación del grano de USA (FAOSTAT, 2020). Este panorama parece difícil de revertir en el corto plazo debido a que el consumo per cápita pasó de 123 kg en 2000 a 196 kg en 2018 (SIAP, 2018), con una población total

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

de 127 millones en 2019 que anualmente se incrementa en un millón de personas (INEGI, 2020).

Para solventar el déficit entre producción y consumo, el gobierno federal ha establecido estrategias y programas para aumentar la productividad, encaminadas a elevar el nivel de vida de los productores, a través de dos componentes:

1. Hacer más productiva la agricultura social de autoconsumo, para satisfacer las demandas de grano y el abasto familiar (Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional -MasAgro-) (Villegas *et al.*, 2018).
2. Hacer una agricultura comercial excedentaria más eficiente, que aumente los rendimientos por unidad de superficie, reduzca las importaciones y haga de la producción una actividad rentable (Adopción maíz genéticamente modificado -OGM-) (Espinosa-Calderón *et al.*, 2014).

Sin embargo, al ser México centro de origen del maíz, la identidad socio-cultural y la diversidad del maíz se ven comprometidas con la política que incentiva la adopción de maíz OGM (González-Estrada y Alferes-Varela, 2010). En este sentido la presente investigación se planteó con los objetivos de asociar la productividad de maíz grano en México entre 1983 y 2018 con la política agrícola nacional, determinar los factores que condicionan la adopción de maíz genéticamente modificado y delimitar regiones de diversidad del maíz nativo, donde no se permita el uso de semillas OGM, para garantizar su preservación, así como sus usos por las etnias del país**.**

Como un primer acercamiento se desarrolló un análisis bibliométrico sobre la producción científica en el tema de maíz transgénico a nivel internacional para determinar de qué manera el desarrollo de la investigación incide en la producción de maíz. De tal forma que la investigación se agrupó en tres capítulos ligados por un método deductivo (**Figura 1**).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

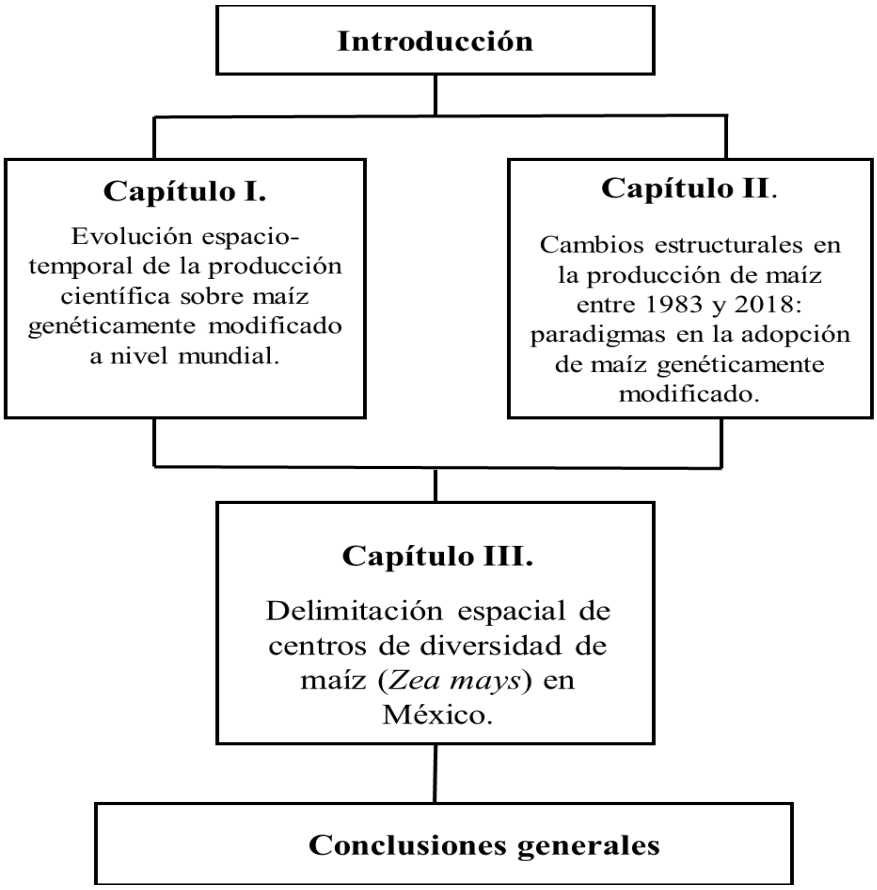


Figura 1. Estructura de la investigación. La identidad cultural del cultivo de maíz en México: importancia y retos ante la apertura comercial de transgénicos.

.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

2. OBJETIVOS

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

2. OBJETIVOS

Los objetivos que se plantearon en esta investigación fueron:

1. Analizar la evolución espacio-temporal de la producción científica sobre el tema de maíz genéticamente modificado a nivel mundial, mediante minería de textos (bibliometria) y análisis de redes sociales (ARS), para evaluar de qué manera el desarrollo de la investigación incide en la producción de maíz.

2. Relacionar la productividad de maíz grano en México entre 1983 y 2018 con la política agrícola nacional y determinar los factores que condicionaron la adopción de maíz genéticamente modificado en las principales regiones productoras del país, mediante el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción.

3. Delimitar los centros de diversidad del maíz en México mediante herramientas GIS que consideren las áreas de riqueza de cada una de las razas y sus parientes silvestres con la presencia de grupos étnicos y diversidad de usos de la planta y grano, para establecer regiones donde no se permita el uso de semillas OGM y se garantice con ello la diversidad del maíz y sus usos por parte de las etnias del país.

El método deductivo propuesto en la investigación comenzó con un análisis general de la producción científica a nivel internacional, sobre el tópico de *maíz genéticamente modificado* y su relación con la productividad en campo de cada uno de los principales países productores de maíz grano; para después asociar la producción de maíz

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

en México con la política agrícola nacional y determinar los factores que condicionan la adopción de maíz OGM. Finalmente, se delimitaron las regiones etnográficas con mayor diversidad de razas nativas de maíz para proponer la restricción del uso de variedades OGM.

En el Capítulo I. *Evolución espacio-temporal de la producción científica sobre maíz genéticamente modificado a nivel mundial* se analizaron con indicadores bibliométricos los artículos científicos publicados en las principales casas editoriales. Mediante minería de textos y análisis de redes sociales se determinaron los temas desarrollados por país, los autores, trabajos y revistas más relevantes en función del número de citas. Además, se explicaron algunos factores del por qué la investigación científica en America Latina se ha centrado en la cantidad y no en la calidad.

En el Capítulo II. *Cambios estructurales en la producción de maíz entre 1983 y 2018: paradigmas en la adopción de maíz genéticamente modificado* se analizó a nivel nacional y estatal la productividad (t) de maíz grano, descompuesta por los factores superficie sembrada (ha) y rendimientos en campo (t ha^{-1}), mediante el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción propuesto por Gómez-Oliver (1994). Se cuantificó la parte del crecimiento de la producción atribuible a cambios en la superficie sembrada y a cambios en el rendimiento en campo. Se propuso una tipología de Estados en función del crecimiento productivo de las áreas maiceras y se asoció esta dinámica con la política agrícola nacional desarrollada por los diferentes gobiernos. Además, se caracterizaron los factores que condicionaron la adopción de maíz genéticamente modificado en las principales regiones productoras del país.

En el Capítulo III. *Delimitación espacial de centros de diversidad de maíz (Zea mays) en México* se desarrolló una metodología para ubicar espacialmente las regiones con mayor diversidad de razas de maíz nativas que se asoció con la presencia de grupos étnicos y diversidad de usos de la planta y grano mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica. Estas regiones etnográficas se propusieron como áreas de restricción donde no se permitiese el uso de semillas OGM.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

3. CAPÍTULO I. EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA SOBRE MAÍZ GENÉTICAMENTE MODIFICADO A NIVEL MUNDIAL

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

3. CAPÍTULO I. EVOLUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA PRODUCCIÓN CIENTÍFICA SOBRE MAÍZ GENÉTICAMENTE MODIFICADO A NIVEL MUNDIAL[1]

3.1 RESUMEN

El maíz es el cereal grano base de la alimentación humana y animal en México y Latinoamérica; constituye un cultivo esencial para la seguridad alimentaria mundial. El objetivo de este trabajo fue analizar la evolución espacio-temporal de la producción científica sobre el tema de maíz OGM, mediante un análisis bibliométrico de los textos disponibles en las principales casas editoriales (Elsevier, Scopus y Springer) y sitios web (Conricyt, Scielo, Redalyc, Latindex, Thomson-Reuters, Periodica, Doaj y Google Scholar) para determinar los factores que incidieron en el impacto de las investigaciones. Se encontraron 917

[1] Santillán-Fernández, A.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Pereira-Lorenzo, S. Spatial-Temporal Evolution of Scientific Production about Genetically Modified Maize. *Agriculture* **2021**, *11*, 246. https://doi.org/10.3390/agriculture11030246

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

textos de 1991 a 2019 cuya evolución espacio-temporal mostró un crecimiento lineal que se concentró en México (225 artículos), USA (165), Brasil (77), Colombia (77), Argentina (51), España (49) y China (42). El bajo impacto (medido por el número de citas bibliográficas) de los trabajos científicos desarrollados en países de Latinoamérica estuvo relacionado con su publicación en revistas editadas en español en los propios países, lo que restringió la crítica constructiva de la revisión por pares. Para el caso de México se encontró, además, un desfase espacial entre los centros de investigación y las áreas de producción, lo que limitó la transferencia de tecnología; además, no se encontraron autores especialistas en el tema de maíz OGM, sino que los investigadores respondieron a *"modas científicas"* acordes con las políticas agrarias del momento; por lo que la investigación sobre maíz OGM en Latinoamérica tiene un amplio margen de mejora a través de la publicación de textos en inglés y en revistas de mayor impacto, lo que puede contribuir a la competitividad agrícola del sector en cada país.

Palabras clave: *Zea mays* L., análisis bibliométrico, artículo científico, endogamia académica, México, moda científica.

3.2 INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es el cereal con mayor volumen de producción a nivel mundial, por encima del trigo (*Triticum aestivum* L.) y el arroz (*Oryza sativa* L.), constituye la base de la alimentación humana para los países de Latinoamérica, en especial México, donde se considera un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria del país (FAOSTAT, 2020). Con el desarrollo de la biotecnología se han creado variedades de maíz OGM con resistencia a insectos y herbicidas, lo que les permite incrementar su productividad (Saxena y Stotzky, 2001).

El maíz es originario de México, territorio donde se cultivan 64 razas derivadas del proceso milenario de domesticación de sus parientes silvestres *Teocintle* y *Tripsacum* en combinación con diferentes ambientes, sistemas agrícolas y grupos étnicos (Dyer y Taylor, 2008). Sin embargo, a pesar de esta diversidad de razas de maíz, México no es el principal productor de maíz en el mundo. El 70,06% de la producción

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

mundial se concentra en 5 países, con USA (35,42%) y China (21,93%) como los principales productores, seguidos de Brasil (7,22%), Argentina (3,01%) y México (2,48%) (FAOSTAT, 2020).

A diferencia de México, USA, China, Brasil y Argentina basan su productividad en el uso de variedades de maíz OGM, que proporcionan mayores rendimientos en campo que las variedades convencionales (Mottaleb *et al*., 2019). Gersbach y Schneider (2015) encontraron que la competitividad agrícola en un país está relacionada directamente con la calidad de las investigaciones que realiza en dicho sector. Para medir la calidad de las investigaciones Cañas-Guerrero *et al.* (2013) propusieron la metodología del análisis bibliométrico que permite estudiar y analizar la evolución de la actividad científica por medio de sus publicaciones.

La publicación de un trabajo científico es el modo más efectivo de transmitir un conocimiento adquirido como consecuencia de la investigación, y su visibilidad es importante para los propios investigadores, para las instituciones en que trabajan y las organizaciones que financian la investigación (Chao *et al.*, 2007). El crecimiento de la producción científica en las últimas décadas y su indización en bases de datos bibliográficas automatizadas han potenciado el uso de la bibliometría y la generación de indicadores para medir los resultados de la actividad científica y tecnológica (Bravo-Vinaja y Sanz-Casado, 2008).

Los estudios bibliométricos a partir de los artículos científicos publicados se basa en la aplicación de métodos cuantitativos, generación de indicadores y modelos matemáticos, que permiten caracterizar su desarrollo y evolución (Peng, 2017). Mediante los indicadores bibliométricos se pueden evaluar las revistas y otras publicaciones periódicas de manera objetiva, observar las tendencias que siguen y generar información útil para mejorar su gestión (Chao *et al*., 2007).

Conocer la información científica que se desarrolla alrededor de un tópico permite tomar decisiones en relación con su mejoramiento (Martínez-Santiago *et al.*, 2017). En el sector agrícola se han

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

desarrollado estudios bibliométricos para evaluar temas generales de agronomía (Cañas-Guerrero *et al.*, 2013), temas específicos como agricultura ecológica (Aleixandre *et al.*, 2015), frutas y hortalizas (Tatry *et al.*, 2014), incluso para agrónomos en particular (Nayak y Bankapur, 2017), revistas agrícolas (Bravo-Vinaja, 2015), sectores agrícolas nacionales (Bravo-Vinaja y Sanz-Casado, 2008) y cultivos específicos como trigo y cebada (Giraldo *et al.*, 2019), y arroz (Peng, 2017; Sun y Yuan, 2020).

Sin embargo, a pesar del crecimiento en el número de publicaciones que se ha presentado en el sector agrícola, y específicamente en temas relacionados con el maíz transgénico, existe poca investigación que evalúe la evolución y el impacto de estas publicaciones a nivel de usuario (Espinosa-Calderón *et al.*, 2014). En virtud de ello el objetivo del presente trabajo fue analizar la evolución espacio-temporal de la producción científica sobre el tema de maíz OGM a nivel mundial, mediante minería de textos (bibliometria) y ARS para determinar los factores que inciden en la calidad de las investigaciones.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1 Origen de la información y preparación de datos

En este trabajo se consideraron artículos científicos sobre maíz transgénico disponibles en las principales casas editoriales (Elsevier, Scopus y Springer) y sitios web (Conricyt, Scielo, Redalyc, Latindex, Thomson-Reuters, Periodica, Doaj y Google Scholar) recopilados entre enero y abril de 2020. Las palabras clave utilizadas en la búsqueda fueron "*maíz transgénico*", "*maíz genéticamente modificado*", "*Genetically modified corn*" y "*Transgenic corn*", identificándolas en los títulos y palabras clave de las publicaciones. Adicionalmente, se utilizó la técnica "bola de nieve" para obtener los artículos faltantes, a partir de la lista de referencias de los artículos encontrados inicialmente (Leipold, 2014).

Para establecer los indicadores bibliométricos, las variables analizadas de cada uno de los artículos fueron: *Nombre de la revista,*

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

institución editora, país de edición e idioma de publicación, que sirvieron para determinar el perfil de las revistas que publican trabajos afines al tópico de *maíz OGM*; *primer autor y colaboradores* que sirvieron para conocer la red de actores involucrados en la investigación; *año* para colocar la información en una línea temporal; e *institución del primer autor* y *país de origen del primer autor* para evaluar la frecuencia de publicaciones de las instituciones por país.

El *código postal de la institución del primer autor* sirvió para efectuar una localización geográfica de la institución de origen de la información; en los casos donde no apareció la dirección postal se buscó el nombre de la institución con herramientas de Google Earth® y en las páginas oficiales de las instituciones. El *título, resumen* y *palabras clave* se utilizaron para categorizar el tópico que aborda la publicación conforme a la clasificación del Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica (CONACYT, 2020) para maíz genéticamente modificado. Finalmente, con el *número de citas* se determinó la utilidad de las publicaciones.

La captura de las variables se realizó en una hoja de cálculo, en la cual se sistematizó y clasificó en áreas temáticas de acuerdo con su contenido; además, se respetó el idioma original de cada uno de los textos. Durante la captura de toda la información se estandarizaron algunos registros, debido a que la información disponible en los artículos algunas veces estaba incompleta o se presentaba con variantes (Aguado-López *et al.*, 2009). Además, se eliminaron o cambiaron caracteres especiales para facilitar el análisis, tales como ñ (por n), acentos, superíndices, subíndices, ®, y ©, entre otros. Por razones de interpretación, la información para el caso de México se separó en tres periodos que coinciden con los periodos de tres administraciones del Gobierno de México: 2001-2006, 2007-2012 y 2013-2018.

3.3.2 Análisis con minería de textos

Con ayuda del algoritmo RcmdrPlugin.temis del software estadístico R (Bouchet-Valat y Bastin, 2013) se obtuvo el número de artículos por año y revista, institución donde se originó la investigación, y artículos donde el autor principal pertenecía a la misma institución que la revista.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

3.3.3 Análisis de redes

Con el software Sci2tool (Börner, 2011) se analizaron las interacciones que existen entre los primeros autores y colaboradores con la finalidad de conocer la constancia en la labor del investigador; es decir, evaluar si ha publicado solo en un año o bien ha publicado de manera constante a través del tiempo, lo que da una idea de su consolidación en el tópico de *maíz OGM*. La sintaxis empleada en el software Sci2tool fue *Extract bipartite Network,* para su visualización se recurrió al software Gephi (Bastian *et al*., 2009).

Finalmente, con ayuda de la variable *código postal* y herramientas de Google Earth® se obtuvieron las coordenadas geográficas en decimas de grado (Longitud, Latitud) de cada uno de los artículos publicados. La representación espacial del número de artículos por institución se efectúo con el paquete geográfico ARGIS® (ESRI, 2015).

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1 Producción científica sobre el tema de maíz OGM en el contexto internacional

De 1991 a 2019 se publicaron un total de 917 artículos científicos que dieron origen a 20997 citas bibliográficas (**Figura 2**). El primer trabajo registrado data de 1991; sin embargo, a partir de 2000 se presentó una producción creciente para el tópico de *maíz OGM*. El periodo de mayor productividad fue de 2008 a 2018 con el 76,23% del total (699 artículos). Los trabajos más citados fueron los publicados en 2003, 2004 y 2005, que en conjunto sumaron 6245 citas (29,74%).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

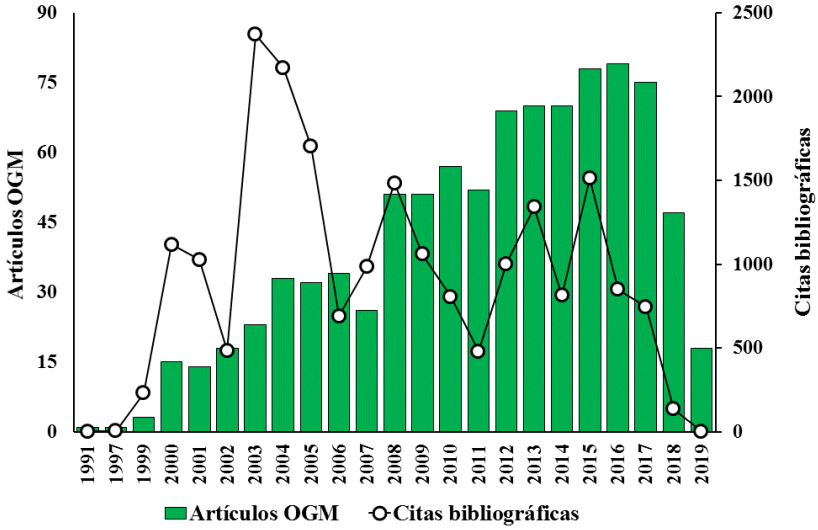
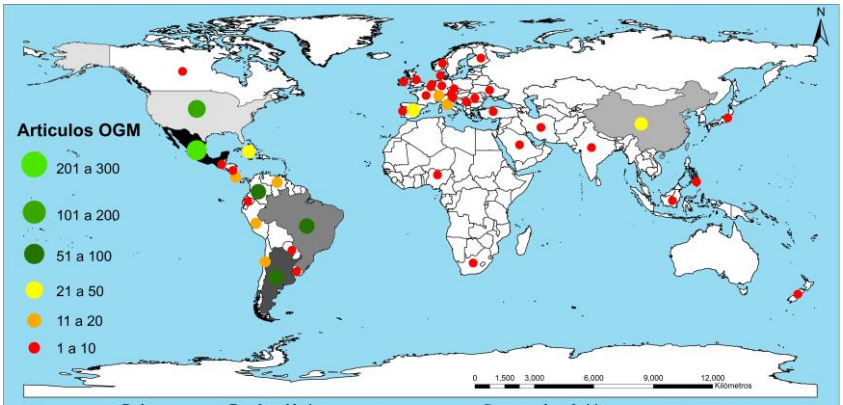


Figura 2. Evolución temporal de la producción científica y citas bibliográficas en el tópico de maíz OGM a nivel mundial de 1991 a 2019.

De acuerdo con el país de origen del primer autor en los artículos científicos, los 917 trabajos se originaron en 53 países. El 74,81% (686) se concentró en siete países: México (24,24%, 225 artículos), USA (17,99%, 165), Brasil (8,40%, 77), Colombia (8,40%, 77), Argentina (5,56%, 51), España (5,34%, 49) y China (4,58%, 42). Destaca el hecho de que los países con mayor producción científica son los países con mayor producción de maíz grano a nivel mundial (**Figura 3**). En la Figura 3 también se observa que los países con mayor número de publicaciones se localizan en America Latina, ello explica que el 55,29% (507 artículos) estén publicados en idioma español, 39,59 % (363) en inglés, 3,93% (36) en portugués, y 1,20% (11) en otros idiomas (principalmente francés, chino y ruso).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



País	Producción*		Lugar	Sup. sembrada**		Rendimiento t ha^{-1}
	Cantidad	%		Cantidad	%	
USA	334,93	35,42	1	33,78	19,02	9,93
China	207,39	21,93	2	36,08	20,32	5,71
Brasil	68,29	7,22	3	14,59	8,22	4,64
Argentina	28,44	3,01	4	4,11	2,32	6,85
México	23,42	2,48	5	7,02	3,96	3,33
Otros	283,08	29,94		81,99	46,18	4,52

Figura 3. Relación espacial de la producción de artículos científicos en el tópico de maíz OGM con indicadores de productividad en campo de 1991 a 2019 (* millones de t, ** millones de ha) obtenidos de FAOSTAT (2020).

De acuerdo a la clasificación CONACYT (2020), con 34 áreas temáticas reagrupadas en seis categorías, se obtuvieron los siguientes resultados: 1) *Productividad* (agricultura, botánica y ecología), el 36,21% del total de artículos; 2) *Competitividad* (economía y ciencias sociales), el 17,34%; 3) *Plagas y enfermedades* (zoología y biología), el 15,81%; 4) *Salud pública* (medicina y nutrición), el 8,72%; 5) *Cultural* (antropología, historia y arqueología), el 4,25%; y 6) *Otros* (ingeniería, geografía, química, derecho y temas diversos), el 17,67%.

En el caso de los principales países que registraron producción científica sobre maíz OGM, los temas de productividad (26,28%, 241 artículos), plagas y enfermedades (12,65%, 116), y competitividad (12,10%, 111) resultaron tener las mayores frecuencias de artículos científicos (**Figura 4**). González-Merino y Ávila-Castañeda (2014) encontraron que la política que adoptó USA para incentivar el desarrollo de innovaciones tecnológicas le permitió convertirse en el principal productor de maíz en el mundo. A diferencia de México,

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

donde el desarrollo de la investigación consistió mayormente en demostrar la no pertinencia del maíz transgénico.

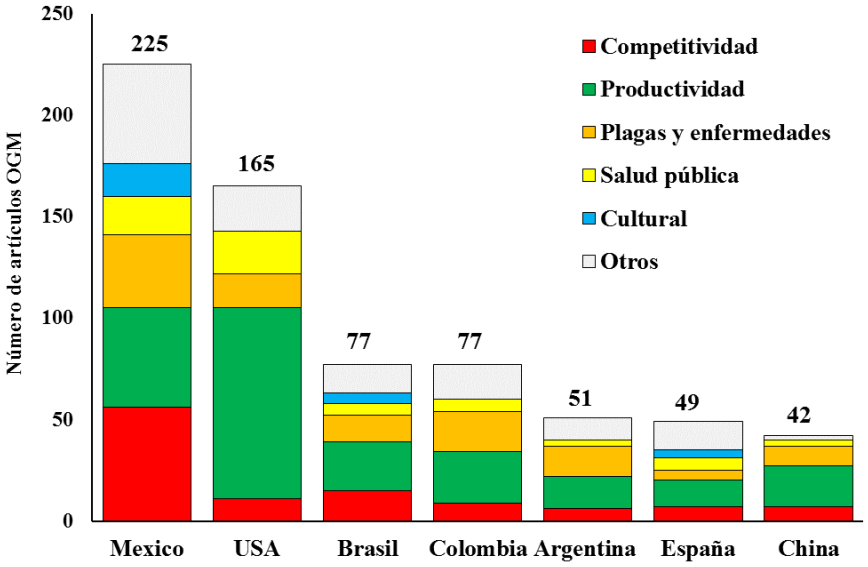


Figura 4. Principales naciones e investigación que abordan, según el país de origen del primer autor en los artículos científicos sobre maíz OGM de 1991 a 2019.

Entre los 917 artículos analizados se encontraron 703 primeros autores, entre autor y colaboradores sumaron 2360 individuos diferentes. La media de coautoría fue de 2,57 y la moda (160 artículos) de 3 autores por artículo, con valores extremos de un solo autor (29 artículos) y 6 trabajos con más de 12 autores. La red de autores y colaboradores (**Figura 5**) estuvo compuesta de 2360 nodos (autores) y 2132 aristas (vínculos). Los vínculos en un ARS son importantes porque es a través de ellos que un autor puede alcanzar ciertas ideas, conocimiento e información que socialmente es distante para él (Granovetter, 1973).

La densidad de la red tuvo un valor de 0,001, lo que implica que para el tópico de maíz OGM no existe mucha colaboración entre los autores en el contexto internacional. Ello queda de manifiesto al encontrarse 501 instituciones (de 917 trabajos) señaladas como la adscripción del primer autor. La densidad es un indicador del ARS que

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

implica que tanto los nodos interactúan (se vinculan) entre sí; matemáticamente es un valor dentro del intervalo [0 a 1], cuanto más cercano al 1 la interacción en la red es mayor (Aguilar-Gallegos *et al.*, 2016).

Las instituciones con mayor frecuencia (≥ 19 artículos científicos) fueron: 1) UAM, México, 36 artículos, principal autor Massieu_Trigo_Y; 2) UNAM, México, 34, Cortes_Flores_JI; 3) UNC, Colombia, 33, Chaparro_Giraldo_A; y 4) COLPOS, México, 19, Castillo_González_F. Cabe desatacar que Chaparro_Giraldo_A de la UNC fue el autor con más contribuciones con un total de 20 (siete como primer autor y 13 como coautor).

Se detectó una subred formada por los investigadores mexicanos (**Figura 5**) Espinosa_Calderon_A, Mejia_Andrade_H y Turren_Fernandez_A del INIFAP; Cortes_Flores_JI de la UNAM; y Serratos_Hernandez_JA de la UACM y Massieu_Trigo_Y de la UAM. En conjunto, los investigadores de la subred forman parte de la Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad en el Programa Agricultura y Alimentacion (Grupo de Maíz Transgénico) (UCCS, 2020).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

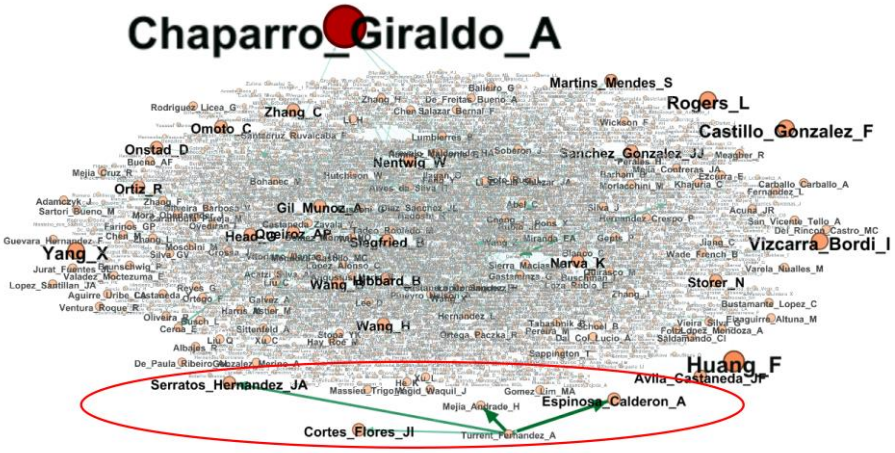


Figura 5. Red de autores y coautores a nivel mundial que han publicado artículos científicos sobre maíz OGM de 1991 a 2019. El tamaño del nodo corresponde con su productividad. La elipse identifica una sub-red formada por investigadores mexicanos.

3.4.2 Indicadores bibliométricos

Los 917 trabajos analizados se publicaron en 449 revistas científicas. Un total de 248 artículos (27,05%) y 8628 citas bibliográficas (41,09%) se concentraron en 20 revistas (**Tabla 1**). Entre estas 20 principales revistas, 13 fueron de países latinoamericanos: México (5), Colombia (4), Argentina (1), Cuba (1), Venezuela (1) y Brasil (1); en su mayoría publican en español y no tienen factor de impacto JCR o un factor muy bajo (Q4), lo que de acuerdo con Li y Zhao (2015) limita el número de citas bibliográficas, al ser el idioma inglés el adoptado como universal por la comunidad científica.

El bajo impacto (citas bibliográficas) de los trabajos científicos desarrollados en países de Latinoamérica está relacionado con el hecho de que los investigadores publican sus trabajos en revistas nacionales (**Tabla 2**), editadas en español; mientras que las revistas de mayor impacto se registran en países anglosajones (Reino Unido y USA) (SRJ, 2020), publicadas en inglés. Ello explica el elevado impacto de los artículos de USA, con un 63,03% de sus trabajos en revistas de su

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

mismo país y el porcentaje restante en revistas de otros países editadas también en inglés.

Entre los 20 trabajos más citados sobre temas de maíz OGM, 14 pertenecen a un primer autor cuya institución de adscripción se localiza en USA y solo un trabajo corresponde a un investigador en Latinoamérica (México); todos han sido publicados en inglés y en revistas de origen anglosajón (**Tabla 3**). De acuerdo con Gersbach y Schneider (2015) el desarrollo económico de un país está relacionado directamente con la calidad de las investigaciones que realiza; países con economías consolidadas (USA, Suiza, Italia y China) invierten más en sus centros de investigación, lo que les permite un mayor desarrollo tecnológico, a diferencia de las economías en subdesarrollo como las Latinoamericanas donde la inversión en investigación es menor. Además, algunas de estas economías consolidadas (Suiza, Italia y China), cuya lengua materna no es el inglés, también publican sus trabajos de mayor impacto en este idioma, el mismo en el que se editan la mayor parte de las revistas indexadas en el Journal Citation Report, incluido en Web of Science (WoS), y pertenece a una empresa de información de USA, Thomson Reuters (WoS, 2020).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 1. Indicadores bibliométricos de las principales revistas que publicaron artículos científicos sobre maíz OGM a nivel mundial de 1991 a 2019, ordenadas de acuerdo al número de artículos publicados.

Revistas científicas					Número	
Nombre	**País**	**Institución**	**WoS (2020)**	**Idioma**	**Artículos**	**Citas**
Journal of economic entomology	Reino Unido	Oxford University Press	1,970/Q2	Inglés	34	1581
PLoS ONE	USA	Public Library of Science	3,057/Q1	Inglés	29	1127
Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas	México	INIFAP	No tiene	Español/Inglés	19	92
Environmental entomology	USA	Entomological Society of America	1,802/Q2	Inglés	15	1038
Cultivos Tropicales	Cuba	Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas	No tiene	Español	14	56
Mundo Agrario	Argentina	Universidad Nacional de La Plata	No tiene	Español	13	381
Revista Colombiana de Entomología	Colombia	Universidad del Valle	0,166/Q4	Español	13	106
El Cotidiano	México	Universidad Autonoma Metropolitana	No tiene	Español	12	67
American Journal of Agricultural Economics	Reino Unido	Oxford University Press	1,436/Q2	Inglés	10	2995
Interciencia	Venezuela	Asociación INTERCIENCIA	0,219/Q4	Español	10	38
Revista Colombiana de Biotecnologia	Colombia	Universidad Nacional de Colombia	No tiene	Español	10	64
Agrociencia	México	Colegio de Postgraduados	0,370/Q3	Español/Inglés	9	73
Revista Fitotecnia Mexicana	México	Sociedad Mexicana de Fitogénetica A.C.	0,326/Q3	Español	9	204
Scientific reports	Reino Unido	Nature Publishing Group	5,228/Q1	Inglés	9	235
Southwestern Entomologist	USA	Society of Southwestern Entomologists	0,478/Q4	Inglés	8	39
Acta Biológica Colombiana	Colombia	Universidad Nacional de Colombia	0,220/Q3	Inglés	7	29
Agronomía Colombiana	Colombia	Universidad Nacional de Colombia	0,180/Q4	Inglés	7	137
Ciencia rural	Brasil	Universidade Federal de Santa Maria	0,376/Q4	Inglés	7	95
Florida Entomologist	USA	Florida Entomological Society	0,975/Q3	Inglés	7	233
Agricultura, Sociedad y Desarrollo	Mexico	Colegio de Postgraduados	No tiene	Español/Inglés	6	38
Otras (429)					669	12.369

Tabla 2. Matriz que relaciona el porcentaje y la cantidad de artículos científicos publicados en revistas de los principales países con producción científica sobre maíz OGM de 1991 a 2019.

	País origen de la revista: % (número de artículos científicos)							Publicación artículos maíz OGM		
País	**Argentina**	**Brasil**	**China ***	**Colombia**	**España**	**USA ****	**México**	**Suma**	**Otro país**	**Total**
Argentina	**64,71 (33)**	5,88 (3)		15,69 (8)				86,27 (44)	13,73 (7)	100 (51)
Brasil	1,30 (1)	**59,74 (46)**		2,60 (2)	9,09 (7)	6,49 (5)		79,22 (61)	20,78 (16)	100 (77)
China	7,14 (3)		**2,38 (1)**		2,38 (1)	26,19 (11)	2,38 (1)	40,48 (17)	59,52 (25)	100 (42)
Colombia		2,60 (2)		**62,34 (48)**	2,60 (2)	2,60 (2)	1,30 (1)	71,43 (55)	28,57 (22)	100 (77)
España		4,08 (2)		4,08 (2)	**55,10 (27)**	4,08 (2)	6,12 (3)	73,47 (36)	26,53 (13)	100 (49)
USA					0,61 (1)	**63,03 (104)**	1,21 (2)	64,85 (107)	35,15 (58)	100 (165)
México	2,67 (6)	0,44 (1)		3,56 (8)	2,67 (6)	4,89 (11)	**78,67 (177)**	92,89 (209)	7,11 (16)	100 (225)

*9,52 (4) en revistas de los Países Bajos, y 26,19 (11) en revistas del Reino Unido. **7,27 (12) en revistas de los Países Bajos, y 9,70 (16) en revistas del Reino Unido.

Tabla 3. Indicadores bibliométricos de los principales artículos científicos sobre maíz OGM a nivel mundial de 1991 a 2019, ordenados de acuerdo al número citas bibliográficas.

Primer autor			Articulo cientifico				
Nombre	**Institución**	**Pais**	**Titulo**	**Revista**	**Pais**	**Idioma**	**Citas**
Lusk *et al.* (2003)	Purdue University	USA	Demand for beef from cattle administered growth hormones or fed enetically modified corn	American Journal of Agricultural Economics	Reino Unido	Inglés	714
Saxena y Stotzky (2001)	New York University	USA	Bt corn has a higher lignin content than non-Bt corn	American Journal of Botany	USA	Inglés	402
Zwahlen *et al.* (2003a)	University of Bern	Suiza	Degradation of the Cry1Ab protein within transgenic *Bacillus thuringiensis* corn tissue in the field	Molecular Ecology	USA	Inglés	331
Jarvis y Hodgkin (1999)	International Plant Genetic Resources Institute	Italia	Wild relatives and crop cultivars: detecting natural introgression and farmer selection of new genetic combinations in agroecosystems	Molecular Ecology	USA	Inglés	230
Zwahlen *et al.* (2003b)	University of Bern	Suiza	Effects of transgenic Bt corn litter on the earthworm *Lumbricus terrestris*	Molecular Ecology	USA	Inglés	224

Tabla 3 (continuación). Indicadores bibliométricos de los principales artículos científicos sobre maíz OGM a nivel mundial de 1991 a 2019, ordenados de acuerdo al número citas bibliográficas.

Gianessi (2005)	CropLife Foundation	USA	Economic and herbicide use impacts of glyphosate-resistant crops	Pest Management Science	USA	Inglés	199
Ortiz-Garcia *et al.* (2005)	Instituto Nacional de Ecología	México	Absence of detectable transgenes in local landraces of maize in Oaxaca, Mexico (2003-2004)	Proceedings of the National Academy of Sciences	USA	Inglés	173
Dively (2005)	University of Maryland	USA	Impact of transgenic VIP3A x Cry1Ab *Lepidopteran*-resistant field corn on the nontarget arthropod community	Environmental entomology	USA	Inglés	147
Lundgren y Wiedenmann (2002)	University of Illinois	USA	Coleopteran-specific Cry3Bb toxin from transgenic corn pollen does not affect the fitness of a nontarget species, coleomegilla maculata degeer (Coleoptera: *Coccinellidae*)	Environmental entomology	USA	Inglés	129
Faria *et al.* (2007)	University of Neuchátel	Suiza	High susceptibility of Bt maize to aphids enhances the performance of parasitoids of lepidopteran pests.	PloS One	USA	Inglés	116

Tabla 3 (continuación). Indicadores bibliométricos de los principales artículos científicos sobre maíz OGM a nivel mundial de 1991 a 2019, ordenados de acuerdo al número citas bibliográficas.

Daly y Buntin (2005)	University of Georgia	USA	Effect of *Bacillus thuringiensis* transgenic corn for *Lepidopteran* control on nontarget arthropods	Environmental entomology	USA	Inglés	110
Davis y Onstad (2000)	Monsanto Company	USA	Seed mixtures as a resistance management strategy for european corn borers (Lepidoptera: *Crambidae*) infesting transgenic corn expressing Cry1Ab protein	Journal of economic entomology	USA	Inglés	109
Buntin *et al.* (2001)	University of Georgia	USA	Evaluation of yield gard transgenic resistance for control of fall armyworm and corn earworm (Lepidoptera: *Noctuidae*) on corn	The Florida Entomologist	USA	Inglés	105
Pilcher *et al.* (2005)	Iowa State University	USA	Impact of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn and crop phenology on five nontarget arthropods	Environmental entomology	USA	Inglés	103
Storer *et al.* (2001)	North Carolina State University	USA	Life history traits of *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: *Noctuidae*) on Non-Bt and Bt transgenic corn hybrids in eastern north Carolina	Journal of economic entomology	USA	Inglés	103

Tabla 3 (continuación). Indicadores bibliométricos de los principales artículos científicos sobre maíz OGM a nivel mundial de 1991 a 2019, ordenados de acuerdo al número citas bibliográficas.

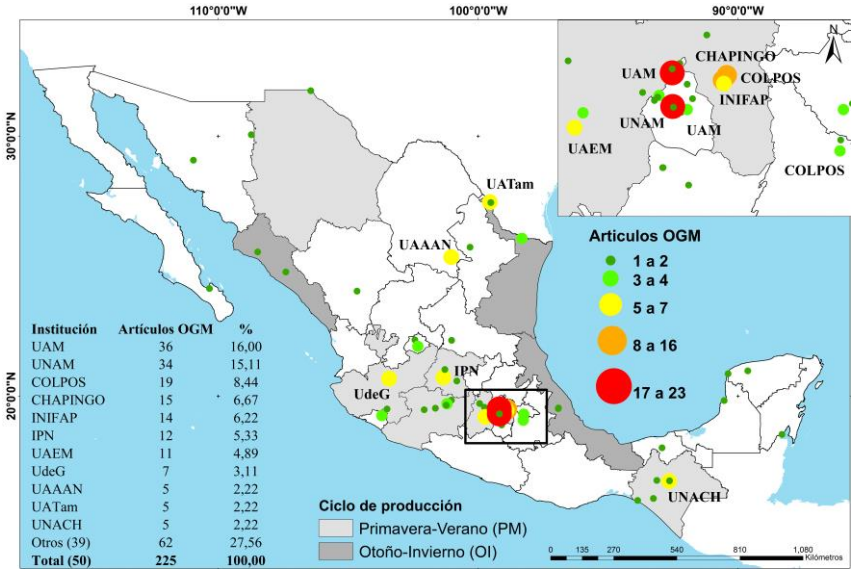
Onstad *et al.* (2001)	Illinois Natural History Survey	USA	Modeling the dynamics of adaptation to transgenic corn by western corn rootworm (Coleoptera: *Chrysomelidae*)	Journal of economic entomology	USA	Inglés	92
Dyer *et al.* 2009	University of California	USA	Dispersal of transgenes through maize seed systems in Mexico	PloS One	USA	Inglés	88
He *et al.* (2003)	Chinese Academy of Agricultural Sciences	China	Evaluation of transgenic Bt Corn for resistance to the asian corn borer (Lepidoptera*: Pyralidae*)	Journal of economic entomology	USA	Inglés	86
Pilcher *et al.* (2002)	Iowa State University	USA	Biotechnology and the european corn borer: measuring historical farmer perceptions and adoption of transgenic Bt Corn as a pest management strategy	Journal of economic entomology	USA	Inglés	82
Bitzer *et al.* (2005)	Iowa State University	USA	Biodiversity and community structure of epedaphic and euedaphic springtails (Collembola) in transgenic rootworm Bt corn	Environmental entomology	USA	Inglés	79

3.4.3 Producción científica sobre el tema de maíz OGM en México

Entre 1991 y 2019 los investigadores mexicanos publicaron 225 artículos científicos sobre el tópico de maíz OGM. De los 225 trabajos, 163 (72,44%) se desarrollaron en 11 de 50 instituciones, tomando como referencia la institución de adscripción del primer autor. Las instituciones con mayor productividad fueron: UAM (36 trabajos), UNAM (34), COLPOS (19), CHAPINGO (15), INIFAP (14) e IPN (12). Por tradición, en CHAPINGO (fundada en 1854), COLPOS (1959) e INIFAP (1985) las investigaciones publicadas se originaron a partir de las iniciativas para el desarrollo de investigación agrícola.

La distribución espacial de las instituciones con productividad científica sobre maíz OGM (1991-2019) **(Figura 6**) permite deducir que la investigación sobre este tópico se localiza en el centro del país; mientras que atendiendo a los estados con mayor producción de maíz grano en México de 2000 a 2019, las áreas de mayor producción se encuentran al norte (Sinaloa y Chihuahua), occidente (Jalisco, Michoacán, Guanajuato y Estado de México), noroeste (Tamaulipas y Veracruz), y sureste (Chiapas) de México. Este aspecto de la centralización de la investigación ha sido abordado por Martínez-Santiago *et al. (*2017), quienes encontraron que el desfase entre las áreas de producción y los centros de investigación dificulta la transferencia de tecnología.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



Institución	Artículos OGM	%
UAM	36	16,00
UNAM	34	15,11
COLPOS	19	8,44
CHAPINGO	15	6,67
INIFAP	14	6,22
IPN	12	5,33
UAEM	11	4,89
UdeG	7	3,11
UAAAN	5	2,22
UATam	5	2,22
UNACH	5	2,22
Otros (39)	62	27,56
Total (50)	**225**	**100,00**

Figura 6. Distribución espacial de las instituciones académicas y de investigación en México que publicaron artículos sobre maíz OGM de 1991 a 2019, y principales áreas de producción.

El idioma preferido por los investigadores mexicanos para publicar sus resultados sobre maíz OGM fue el español en el 88,44% (199) de los trabajos, seguido del inglés para el restante 11,56% (26). Los temas de mayor interés fueron los relacionados con competitividad (56 trabajos, 24,89%) y productividad (49, 21,78%) orientados a demostrar la no pertinencia del maíz OGM en el campo mexicano. Los 225 trabajos se publicaron en 123 revistas diferentes, 86 de las cuales fueron editadas por instituciones nacionales que en total publicaron 177 artículos (78,67%).

En México la mayoría de los investigadores publicaron sus trabajos sobre maíz OGM en revistas editadas por su institución de adscripción (**Tabla 4**), que restringe la crítica constructiva de la revisión por pares y, de acuerdo con Silva *et al.* (2014) y Franco *et al.* (2016), es indicador del bajo impacto de las publicaciones, pues limita que grupos interdisciplinarios retroalimenten la pertinencia de la investigación. Al

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

respecto Martínez-Santiago *et al.* (2017) y Vargas-Larreta *et al.* (2017) encontraron que la investigación en México no solo presenta *endogamia académica* sino que además los investigadores, en su afán por permanecer en el SNI-CONACYT, tienden a replicar las mismas metodologías en áreas de estudios diferentes, lo que limita la innovación en la investigación y permite la circularidad (redundar en el objeto de estudio) de las publicaciones.

Finalmente, la red de autores y colaboradores, para el caso de las publicaciones donde el primer autor estuvo adscrito a una institución mexicana, se dividió en tres periodos: 2001-2006, 2007-2012 y 2013-2018. Los periodos propuestos corresponden con las políticas que imperaron en el país en los diferentes gobiernos. Por periodos, el número de autores pasó de 59 en 2001-2006 a 130 en 2007-2012 y 291 en 2013-2018. Los artículos también se incrementaron de 24 a 76 y 111, respectivamente (**Tabla 5**). Según Martínez-Santiago *et al.* (2017), el incremento en autores y artículos que ha venido sosteniendo México en el sector agroforestal se debe a que el SNI-CONACyT premia más la cantidad que la calidad. Por su parte Villegas *et al.* (2018) encontraron que las políticas agrícolas que ha adoptado México en sus diferentes gobiernos ha incentivado el desarrollo de investigación sobre el tema de maíz OGM.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 4. Matriz que relaciona el porcentaje y la cantidad de artículos científicos publicados en revistas institucionales de los principales centros académicos y de investigación con producción científica sobre maíz OGM de 1991 a 2019 en México.

Revista				Institución del primer autor							Total
Nombre	Institución	WoS (2020)	Idioma	UAM	UNAM	COLPOS	CHAPINGO	INIFAP	IPN	Otras	
Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas	INIFAP	No tiene	Español**	10,53 (2)		15,79 (3)	10,53 (2)	**36,84 (7)**		26,32 (5)	100,00 (19)
El Cotidiano	UAM	No tiene	Español	**50,00 (6)**	8,33 (1)				8,33 (1)	33,33 (4)	100,00 (12)
Agrociencia	COLPOS	0,370/Q3	Español**			**44,44 (4)**	22,22 (2)			33,33 (3)	100,00 (9)
Revista Fitotecnia Mexicana	Fitogenética A.C.*	0,326/Q3	Español		11,11 (1)	**55,56 (5)**		11,11 (1)		22,22 (2)	100,00 (9)
Argumentos	UAM	No tiene	Español	**100,00 (8)**							100,00 (8)
Agricultura, Sociedad y Desarrollo	COLPOS	No tiene	Español**			**50,00 (3)**	33,33 (2)			16,17 (1)	100,00 (6)
Soociologica	UAM	No tiene	Español	**80,00 (4)**	20,00 (1)						100,00 (5)
Acta Universitaria	UGTO	No tiene	Español				20,00 (1)	20,00 (1)	60,00 (3)		100,00 (5)
Sociedad y Ambiente	ECOSUR	No tiene	Español		40,00 (2)	20,00 (1)			40,00 (2)		100,00 (5)
AGROProductividad	COLPOS	No tiene	Español			**60,00 (3)**				40,00 (2)	100,00 (5)
Revista de Geografía Agrícola	CHAPINGO	No tiene	Español**				**100,00 (4)**				100,00 (4)

*Asociación Civil que es coordinada por investigadores del COLPOS, **Se edita una versión en inglés

Con la promulgación de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable en 2001 (LDRS, 2001) se dio inicio a la investigación en México sobre el tópico de maíz OGM, anterior a ello los estudios se centraban en lograr los mejores rendimientos con germoplasmas nativos o mejorados mediante la hibridación (Villegas *et al.*, 2018). El gobierno de 2007-2012 incentivó el uso de semilla OGM y los estudios se centraron en destacar la no pertinencia geopolítica de esta biotecnología en México, centro de origen y domesticación del maíz (Espinosa-Calderón *et al.*, 2014). Finalmente, el gobierno de 2013-2018 motivó el uso de variedades mejoradas de maíz (nativas) mediante el Programa de Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional (MasAgro) y los estudios giraron en torno a argumentar que es posible lograr la autosuficiencia (seguridad alimentaria) sin necesidad de recurrir al uso de variedades OGM (Villegas *et al.*, 2018).

Las redes de coautoría construidas de acuerdo al grado de entrada de los autores en la red, permitieron identificar la importancia (referencia) del autor en la red, al cuantificar el número de vínculos que recibe un autor provenientes de otros (Aguilar-Gallegos *et al.*, 2016). En 2001-2006 no hubo ningún autor con referencia alta, se encontraron 3 autores con referencia media (Soberon_J, Schoel_B y Ezcurra_E) (**Figura 7**). En 2007-2012 hubo un autor con referencia alta (Castillo_Gonzalez_F) (**Figura 8**) y en 2013-2018 dos (Vizacarra_Bordi_I y Avila_Castaneda_JF) (**Figura 9**), los autores de referencia media se incrementaron en 5 y 18 respectivamente (**Tabla 5**). Sin embargo, a pesar de estos incrementos, de 2001 a 2018 no se observó un autor cuya investigación haya sido constante, lo que hace suponer que no existen en el país especialistas en el tema, sino más bien que las investigaciones respondieron a tendencias científicas acordes con las políticas agrarias del momento.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 5. Indicadores de las redes de coautoría para los periodos 2001-2006, 2007-2012 y 2013-2018 de los artículos científicos publicados sobre maíz OGM donde el primer autor es mexicano.

Indicadores	Periodos					Total
	1991-2000	2001-2006	2007-2012	2013-2018	2019	
Artículos cientificos	3	24	76	111	11	225
Primer autor	5	21	67	103	11	207
Coautores	5	38	63	188	26	320

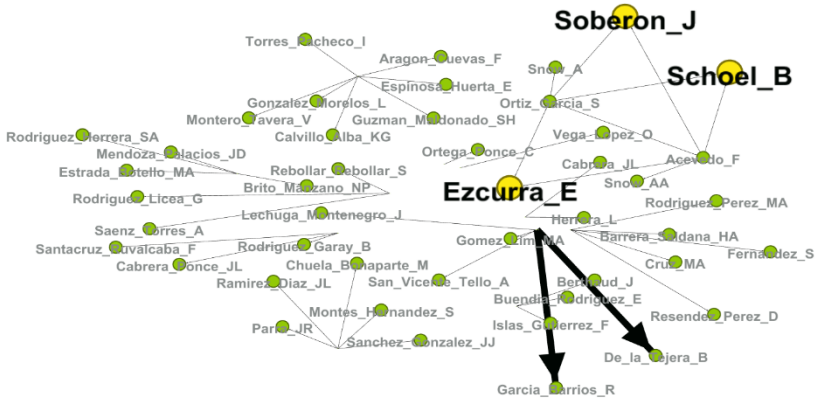


Figura 7. Red de autores y coautores para el periodo 2001-2006 que publicaron artículos científicos sobre maíz OGM donde el primer autor es mexicano.

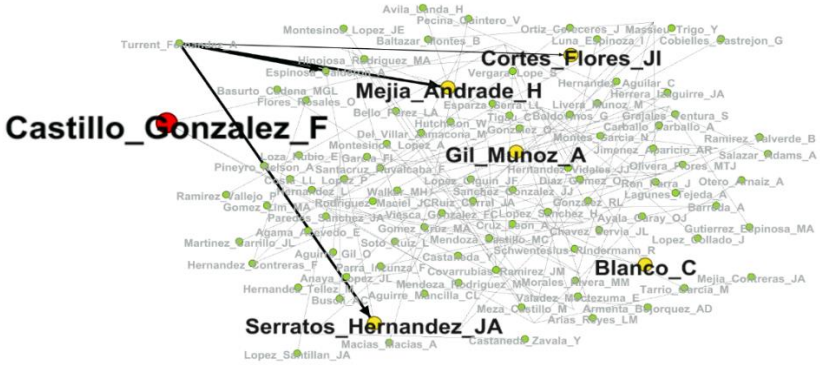


Figura 8. Red de autores y coautores para el periodo 2007-2012 que publicaron artículos científicos sobre maíz OGM donde el primer autor es mexicano.

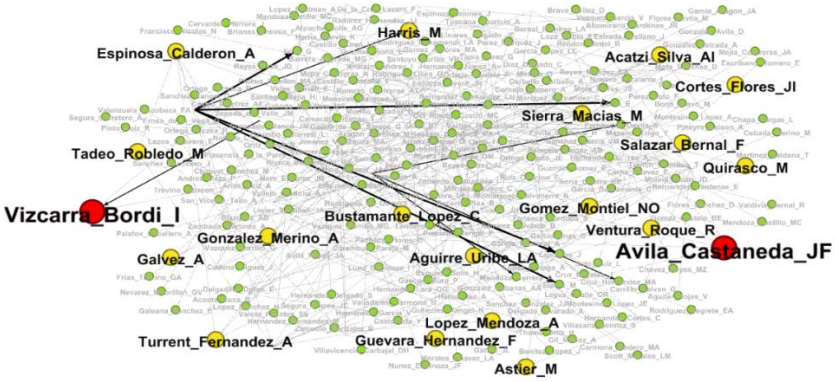


Figura 9. Red de autores y coautores para el periodo 2013-2018 que publicaron artículos científicos sobre maíz OGM donde el primer autor es mexicano.

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

4. CAPÍTULO II. CAMBIOS ESTRUCTURALES EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ ENTRE 1983 Y 2018: PARADIGMAS EN LA ADOPCIÓN DE MAÍZ GENÉTICAMENTE MODIFICADO

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

4. CAPÍTULO II. CAMBIOS ESTRUCTURALES EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ ENTRE 1983 Y 2018: PARADIGMAS EN LA ADOPCIÓN DE MAÍZ GENÉTICAMENTE MODIFICADO [2]

4.1 RESUMEN

México depende de la importación de maíz para satisfacer su demanda nacional. El uso de variedades nativas de maíz entre los agricultores de subsistencia puede ayudar a reducir la importación del cereal. Sin embargo, la política agrícola en México para mejorar la productividad por hectárea se ha centrado en el uso de variedades mejoradas, entre

[2] Santillán-Fernández, A.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Carmona-Arellano, M.A.; Vera-López, J.E.; Pereira-Lorenzo, S. Relationship between Maize Seed Productivity in Mexico between 1983 and 2018 with the Adoption of Genetically Modified Maize and the Resilience of Local Races. *Agriculture* **2021**, 11, 737. https://doi.org/ 10.3390/agriculture11080737.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ellas las transgénicas. En este estudio se analizó la productividad de maíz en México entre 1983 y 2018 para determinar la influencia que las políticas agrícolas han tenido en el sector, y los factores que condicionan la adopción de maíz transgénico. Se encontró que la política agrícola mejoró la productividad de aquellas regiones con riego; sin embargo, para las de secano no se lograron los cambios tecnológicos esperados, debido a que fue más fuerte la tradición ancestral en el cultivo, asociada a la mayor variedad de razas de maíz nativos y a una mayor población indígena. La adopción de maíz transgénico también resultó poco significativa en las regiones de secano, debido a que el incremento en los rendimientos de campo no fue económicamente rentable respecto al incremento en los costos de producción. Por lo tanto, la política agrícola para incrementar la productividad se debería orientar en la protección de los agricultores de subsistencia, revalorizando el uso de variedades nativas que han demostrado mayor resiliencia a los cambios tecnológicos y ambientales.

Palabras clave: *Zea mays* L.; maíz transgénico; agricultura de secano; agricultura de riego; procampo; MasAgro.

4.2 INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es el cereal de mayor producción a nivel mundial, por delante del trigo (*Triticum aestivum* L.) y el arroz (*Oryza sativa* L.), constituye la base de la alimentación humana para los países de Latinoamérica (FAOSTAT, 2020), donde México se considera su centro de origen (Dyer y Taylor, 2008). Sin embargo, México no es el principal productor de maíz en el mundo, el 57,35% de la producción mundial se concentra en dos países, Estados Unidos de America (USA, 35,42%) y China (21,93%) (FAOSTAT, 2020).

A diferencia de México, USA basa su productividad en el uso de variedades de maíz transgénico, que proporcionan mayores rendimientos en campo que las variedades convencionales, lo que le permite a USA tener rendimientos superiores a las 10 t ha^{-1}, mientras que México obtiene en promedio 3,33 t ha^{-1} (Mottaleb *et al*., 2019). En

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

México la producción de maíz se realiza a partir de variedades mejoradas y variedades nativas, ya que se cultivan 64 razas autóctonas de maíz derivadas del proceso milenario de domesticación de su pariente silvestre teosinte en combinación con diferentes ambientes, sistemas agrícolas y grupos étnicos, lo que le confiere una gran agrodiversidad (Santillán-Fernández *et al.*, 2021a).

En México se cultivan aproximadamente 7 millones de ha de maíz grano, con una producción de 23 millones de t. Sin embargo, el consumo nacional es de alrededor de 39 millones de toneladas, por lo que el déficit se solventa con la importación del grano procedente de USA (FAOSTAT, 2020). Este panorama parece difícil de revertir en el corto plazo debido a que el consumo per cápita pasó de 123 kg en 2000 a 196 kg en 2018 (SIAP, 2020), con una población total de 127 millones en 2019 que se incrementa anualmente en un millón de personas (INEGI, 2020).

Para garantizar la seguridad alimentaria de maíz grano en México, la política agrícola nacional ha establecido estrategias y programas cuyas metas han sido incrementar los rendimientos en campo y mejorar la rentabilidad para los productores (Sánchez-Cano, 2014; González-Merino y Ávila-Castañeda, 2014). De esta forma, en 1994 se creó el Programa de Apoyos Directos al Campo (PROCAMPO) (Corte-Cruz y Carrillo-Huerta, 2018); en el sexenio 2007-2012 se fomentó el uso de variedades de maíz genéticamente modificado (Espinosa-Calderón *et al.*, 2014); y a partir de 2012 se creó el programa Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional (MasAgro) (Villegas *et al.*, 2018).

El objetivo del programa PROCAMPO no solo fue incrementar la producción de maíz grano por medio del aumento de la superficie sembrada (ha), sino además regularizar los derechos de propiedad sobre la tierra (Corte-Cruz y Carrillo-Huerta, 2018); mientras que el programa MasAgro pretendió hacer más productiva la agricultura social de autoconsumo, para satisfacer las demandas de grano y el abasto familiar (Villegas *et al.*, 2018). A diferencia de estos dos programas que han sido aplicados, la estrategia de producir variedades de maíz

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

genéticamente modificado para incrementar los rendimientos en campo no ha sido implementada (Santillán-Fernández *et al.*, 2021b).

Santillán-Fernández *et al.* (2014) consideraron que el análisis de la productividad agrícola ayuda a comprender y mejorar la competitividad de un cultivo, al estudiar la interacción de la superficie sembrada con los rendimientos en campo, donde se manifiestan las técnicas de preparación del suelo y siembra con las prácticas de manejo agronómico, y la adopción de nuevas tecnologías de producción. Para analizar la productividad agrícola, el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción propuesto por Gómez-Oliver (1994) ha demostrado ser una metodología eficiente que determina de manera precisa la influencia que tienen los rendimientos en campo, la superficie sembrada, y la interacción de ambos en el crecimiento de la producción en un periodo final con respecto a un periodo inicial.

El modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción agrícola ha sido aplicado con buenos resultados en el análisis de sectores como el de frutas y hortalizas (Cruz-Delgado *et al*., 2013), fruticultura (Schwentesius y Sangerman, 2014), y cultivos específicos como la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) (Santillán-Fernández *et al.*, 2014) y vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews) (Santillán-Fernández *et al.*, 2018). Un factor importante para que la productividad de un sector agrícola mejore es la adopción de nuevas tecnologías de producción, donde la edad, nivel de estudios, tamaño de la parcela y el ingreso familiar que representa la actividad para los productores son factores que condicionan la adopción (Soto *et al.*, 2006).

Bajo este contexto, el objetivo de este trabajo fue analizar la productividad de maíz grano en México entre 1983 y 2018 mediante el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción, para determinar la influencia que las políticas agrícolas han tenido en el crecimiento del sector, y los factores que condicionaron la adopción de maíz genéticamente modificado.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

4.3.1 Producción y consumo de maíz a nivel mundial

De la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) se obtuvieron datos sobre producción (t), superficie sembrada (ha), rendimiento en campo (t ha^{-1}), consumo (t), importación (t) y exportación (t) de los principales países productores y consumidores de maíz grano en el mundo para el periodo 2007-2018 (FAOSTAT, 2020).

4.3.2 Producción y consumo de maíz en México

La producción de maíz grano (t), su consumo (t) y el número de habitantes (población) de 1983 a 2018 en México se obtuvieron de FAOSTAT (2020). La serie 1983-2018 se dividió en periodos de seis años, conforme los sexenios de los gobiernos en México: 1983-1988, 1989-1994, 1995-2000, 2001-2006, 2007-2012 y 2013-2018. En cada periodo se calculó la Tasa Media de Crecimiento Anual en % (TMCA) para cada variable.

Del Sistema de Información Agrícola y Pesquera (SIAP, 2020) se obtuvieron las variables: producción (t), superficie sembrada (ha), rendimiento en campo (t ha^{-1}) y consumo (t) de maíz grano a nivel estatal de 1983 a 2019. Las primeras tres variables se obtuvieron para los dos ciclos de producción que se registran en México: Primavera-Verano (PV) y Otoño-Invierno (OI) en las dos modalidades riego y secano. Para el caso de consumo (t) solo se encontró información disponible a partir del periodo 2013-2018. Se tomó como referencia la clasificación de zonas económicas de México propuesta por Mendoza-Vargas (2017) para obtener los balances promedios del periodo 2013-2018 sobre producción menos consumo, por región.

4.3.3 Productividad de maíz grano en México

Para analizar la productividad de maíz grano a nivel nacional y estatal se utilizó el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción propuesto por Gómez-Oliver (1994). El modelo

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

determina en porcentaje la influencia que tienen los rendimientos en campo (RC), la superficie sembrada (SS) y la interacción RC×SS en el crecimiento de la producción de un periodo final con respecto a un periodo inicial.

Los periodos analizados fueron 1983-1988 versus 1989-1994, 1989-1994 versus 1995-2000, 1995-2000 versus 2001-2006, 2001-2006 versus 2007-2012 y 2007-2012 versus 2013-2018. Además, se empleó la metodología propuesta por Santillán-Fernández *et al.* (2014) para clasificar a los Estados en los que aumentó la producción y en los que disminuyó de 2013-2018 respecto de 2007-2012 (**Tabla 6**).

Tabla 6. Tipología para determinar el crecimiento en la producción de un sector agrícola en función de las variaciones porcentuales de la superficie sembrada y rendimientos en campo.

Tipología	Crecimiento de la Producción (%)*	Factores que explican el crecimiento	
		Superficie sembrada (%)	Rendimiento en campo (%)
A	Aumenta	Aumenta	Aumenta
B	Aumenta	Aumenta	Disminuye
C	Aumenta	Disminuye	Aumenta
D	Disminuye	Aumenta	Disminuye
E	Disminuye	Disminuye	Aumenta
F	Disminuye	Disminuye	Disminuye

*Crecimiento de la Producción (%) = Superficie sembrada (%) ± Rendimiento en campo (%). El crecimiento aumenta o disminuye en función del factor que más lo condiciona, por ejemplo para las categorías C y E, la superficie sembrada disminuye y el rendimiento en campo aumenta; sin embargo, la producción crece para la categoría C en virtud de que los rendimientos en campo compensaron la reducción en superficie sembrada, lo que no ocurre en la categoría E, donde la reducción de superficie sembrada fue mayor a la eficiencia en el aumento de los rendimientos en campo.

La productividad nacional también se analizó mediante un análisis de varianza, las diferencias significativas para las variables producción (t), superficie sembrada (ha) y rendimiento en campo (t ha^{-1}) para los periodos 1983-1988, 1989-1994, 1995-2000, 2001-2006, 2007-2012 y 2013-2018. Además, se aplicó el test de Tukey para determinar si existían diferencias significativas al 5 %.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

4.3.4 Indicadores de adopción de maíz OGM

Del Sistema de Información Agrícola y Pesquera (SIAP, 2020) se obtuvo la producción (t) de maíz grano de los municipios que registraron operaciones continuas de 1983 a 2018 en PV y OI. Para determinar las áreas de mayor productividad se sumó la producción anual por municipio para el periodo de análisis, y mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica se representó espacialmente. Los resultados se agruparon en cinco intervalos de clase: muy baja, baja, media, alta y muy alta producción, tanto para PV como OI.

Finalmente, para determinar si los productores de las principales regiones productoras de maíz grano en México están dispuesto a adoptar maíz OGM, se realizó una encuesta entre agosto y noviembre de 2017. Los criterios para seleccionar a los productores fueron su disponibilidad y referencias en la región y fueron convocados por las dependencias estatales de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). La encuesta incluyó preguntas sobre la edad (años), la escolaridad (años de estudio), la experiencia en la actividad (años), la superficie cultivada (ha), el rendimiento en campo (t ha^{-1}) en PV y OI, el ingreso familiar que representa la actividad (%) y la cuestión ¿adoptaría maíz OGM?

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.1 Producción y consumo de maíz grano a nivel mundial

El 73.76% de la producción mundial de maíz grano de 2007-2018 se concentró en 5 países, con USA (35,42%) y China (21,93%) como los principales productores, seguidos de Brasil (9,34%), Argentina (4,59%) y México (2,48%) (**Tabla 7**). La producción de USA y China en el periodo de análisis se basó en la amplia superficie sembrada que se destinó al cultivo de maíz, y a los buenos rendimientos en campo, que para el caso de China (5,71 t ha^{-1}) solo fueron superados por Argentina (6,85 t ha^{-1}).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

El modelo intensivo de producción de maíz que ha desarrollado USA es el resultado de la interacción de sistemas mecanizados con la adopción de variedades transgénicas, lo que le permite obtener los mejores rendimientos en campo a nivel mundial (9,93 t ha^{-1}) (González-Merino y Ávila-Castañeda, 2014). En America Latina, Brasil (tercer productor mundial) y Argentina (cuarto) también basan su producción en el uso de variedades transgénicas de maíz (Hernández-Vidal, 2018). Para el caso de México, los bajos rendimientos en campo que se obtuvieron (3,33 t ha^{-1}) fueron el resultado de la combinación de variedades nativas con sistemas de producción tradicionales en secano, los que de acuerdo con Ureta *et al.* (2013) y Perales y Golicher (2014) se explican por la etnogeografia y cultura del país, al ser centro de origen del maíz.

El 61,63% del maíz que se exporta en el mundo tiene origen americano, USA (32,60%) es el principal exportador, seguido de Brasil (16,14%) y Argentina (12,89%). De los cinco principales productores de maíz, México es el país que más importa el cereal (8,23%), esto se explica por ser el cuarto país con mayor consumo (3.39%), solo por detrás de USA (26,93%), China (23,56%) y Brasil (5,31%). A diferencia de USA, donde la mayor parte del consumo de maíz se destina a la producción de etanol (Mottaleb *et al*., 2019), en México el consumo es fundamentalmente en la alimentación animal y humana (Villegas *et al.*, 2018).

El maíz que se importa en México proviene de USA (González-Merino y Ávila-Castañeda, 2014), por lo que autores como Chauvet y Lazos (2014) y Hernández-Hernández *et al.* (2016) sostienen que la adversión que la población mexicana presenta al maíz transgénico está injustificada, pues el déficit entre producción y consumo en realidad se solventa con maíz transgénico. Al respecto, Santillán-Fernández *et al.* (2021a) encontraron que el cultivo de razas nativas en México contribuye a que las importaciones del grano sean en menor cantidad y garantizan la seguridad alimentaria de las regiones con mayor rezago social, donde además las razas nativas muestran mayor resiliencia a las condiciones ambientales de secano, lo que les ha permitido mantenerse

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

en la preferencia de los productores de subsistencia (Huffman *et al.*, 2018; Hufford *et al.*, 2019).

4.4.2 Producción y consumo de maíz en México

El déficit entre producción y consumo, que históricamente ha presentado México, tiene su origen en la década de 1970, cuando la política agroalimentaria del país incentivó la importación del grano ante los altos costos de producción (González-Estrada y Alferes-Varela, 2010). A partir de 1994 la diferencia entre producción y consumo muestra una tendencia creciente (Figura 1), este hecho coincide con la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) que México estableció con USA y Canadá.

De acuerdo con Valencia-Romero *et al.* (2019) la firma del TLCAN provocó que México incrementara la importación de maíz grano, al reducirse los aranceles de importación. Sin embargo, el TLCAN solo evidenció el problema de la productividad del campo mexicano, con TMCA negativas, lo que se ha agudizado por el incremento sostenido de la población que demanda mayor cantidad de maíz grano, con una media de consumo anual per cápita de 196 kg (**Figura 10**) (SIAP, 2020).

La politica agroalimentaria de México en el sexenio 1983-1988 provocó que la TMCA de ese periodo fuese negativa (-3,59%), al priorizar las importaciones sobre los programas de fortalecimiento al campo (Los Santos-Ramos *et al*., 2017). El mayor incremento en la producción se dio en el sexenio de 1989-1994 (TMCA, 8,87%) con el Programa de Apoyos Directos al Campo (PROCAMPO) (Corte-Cruz y Carrillo-Huerta, 2018), lo que no solo supuso la implementación de estrategias para mejorar la competitividad, sino que además regularizó los derechos de propiedad sobre la tierra. La crisis social y económica que vivió México en el periodo 1995-2000 repercutió en la productividad agrícola nacional y el maíz (TMCA, -0,74%) no fue la excepción (Los Santos-Ramos *et al*., 2017).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 7. Indicadores de campo y comercio de los principales países productores y consumidores de maíz grano a nivel mundial de 2007 a 2018.

País	Indicadores de campo						Indicadores de comercio								
	Producción*		Lugar	S. Sembrada**		Rendimiento t ha^{-1}	Consumo*		Lugar	Importación*		Lugar	Exportación*		Lugar
	Cantidad	%		Cantidad	%		Cantidad	%		Cantidad	%		Cantidad	%	
USA	334,93	35,42	1	33,78	19,02	9,93	310,64	26,93	1	1,53	0,96	27	51,31	32,60	1
China	207,39	21,93	2	36,08	20,32	5,71	271,73	23,56	2	7,73	4,84	5	0,24	0,15	32
Brasil	88,29	9,34	3	14,59	8,22	4,64	61,13	5,30	3	1,37	0,86	28	25,41	16,14	2
Argentina	43,44	4,59	4	4,11	2,32	6,85	14,05	1,22	7	0,01	0,01	135	20,28	12,89	3
México	23,42	2,48	5	7,02	3,96	3,33	39,14	3,39	4	13,15	8,23	2	1,32	0,84	16
Otros	248,08	26,24		81,99	46,18	4,52	456,73	39,60		136,00	85,11		58,86	37,39	
Total	945,55	100,00		177,55	100,00		1153,42	100,00		159,78	100,00		157,41	100,00	

*Millones de toneladas, **Millones de hectáreas. La cantidad de consumo para el periodo de análisis resultó ser mayor a la de producción, esto se debió al stock inicial en cada uno de los años, que considera la cantidad de maíz grano en almacén.

La promulgación de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS) en 2001 (LDRS, 2001) supuso un repunte para el sector agrícola en el sexenio 2001-2006 (TMCA, 1,41%). Sin embargo, en el periodo 2007-2012, con la política nacional de permitir el cultivo de maíz OGM, la productividad se redujo (TMCA, -1,05%) por la incertidumbre que se generó entre los pequeños productores (Chauvet y Lazos, 2014). En el ultimo sexenio (2013-2018), con el programa MasAgro se incrementó la producción nacional a través del uso de variedades nativas de maíz (TMCA, 3,07%) con pequeños productores (Donnet *et al.*, 2017). A pesar de todos estos esfuerzos, la producción de maíz grano en México es insuficiente para garantizar la seguridad alimentaria de una población en continuo crecimiento (Murray-Tortarolo *et al.*, 2018).

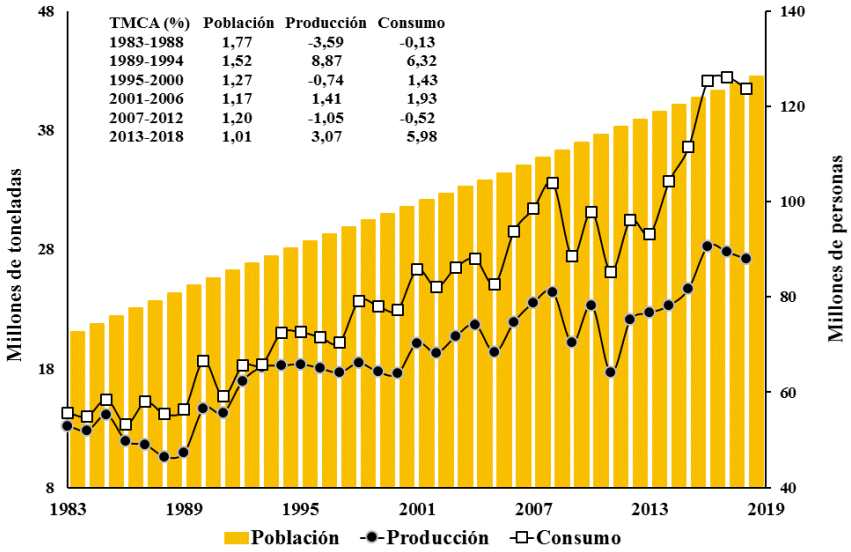


Figura 10. Evolución temporal de la población mexicana y su relación con la producción, y consumo de maíz de 1983 a 2018 (TMCA, Tasa Media de Crecimiento Anual).

La producción de maíz grano en México se realiza en dos periodos: Primavera-Verano (se siembra en mayo y se cosecha en octubre) y Otoño-Invierno (se siembra en diciembre y se cosecha en mayo), ambos en dos modalidades riego y secano. La brecha tecnológica entre las regiones de producción con riego y las de secano es evidente en los

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

rendimientos en campo (**Tabla 8**), mientras que para riego son superiores a las 7 t ha^{-1}, para secano resultan inferiores a las 2 t ha^{-1}. Donnet *et al.* (2017) atribuyeron estas diferencias no solo a los sistemas de riego, sino al uso de variedades mejoradas, debido a que la producción de maíz en riego es para uso industrial, mientras que en secano normalmente es de subsistencia con semillas nativas seleccionadas de cosechas anteriores.

El 73,98% de la superficie sembrada con maíz grano en México depende de las lluvias de verano y aporta el 49,83% de la producción total, se desarrolla en un contexto de subsistencia, con bajo nivel tecnológico y manejo agronómico inadecuado (Donnet *et al.*, 2017), lo que da como resultado rendimientos en campo de 2,42 t ha^{-1} (**Tabla 8**). Por otra parte, las zonas de riego suponen el 19,91% de la superficie sembrada, donde se obtiene el 46,75% de la producción nacional con rendimientos promedios superiores a las 7 t ha^{-1}. En México, por 1 ha de cultivo en riego, se siembran 4 ha en secano, y por cada t de maíz grano en secano se obtienen 3,76 t en riego.

El problema de la baja productividad de maíz grano en secano ha sido documentada por González-Estrada y Alferes-Varela (2010), González-Merino y Ávila-Castañeda (2014) y Donnet *et al*. (2017). Estos autores coinciden en que el problema es de carácter espacial, temporal y cultural, ya que más del 80% de los productores, sobre todo en el sureste del país, cultivan maíz grano de variedades nativas en parcelas de menos de 2 ha, en el sistema ancestral milpa (asociación de maíz nativo con frijol -*Phaseolus vulgaris*- y calabaza -*Cucurbita spp.*-) y con labores culturales (manejo del cultivo) rudimentarias de bajo costo.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 8. Promedio de los indicadores de campo de la producción de maíz grano en México por ciclo de producción y régimen hídrico de 2013 a 2018.

	Superficie Sembrada		Rendimiento	Producción	
Ciclo	**ha**	**%**	**t ha^{-1}**	**t**	**%**
OI Riego	706.498,41	9,38%	8,90	6.151.702,98	24,00%
OI Secano	459.989,72	6,11%	1,93	877.570,41	3,42%
PV Riego	793.171,78	10,53%	7,43	5.832.350,80	22,75%
PV Secano	5.570.905,11	73,98%	2,42	12.774.029,20	49,83%
Total	7.530.565,02	100,00%		25.635.653,39	100,00%

La tendencia creciente en la producción de maíz grano para el ciclo PV-Secano puede revertirse en el corto plazo, como consecuencia de la reducción de la superficie sembrada a partir del año 2000 y un nulo crecimiento de los rendimientos en campo en el mismo ciclo (**Figura 11**). Al respecto, Murray-Tortarolo *et al.* (2018) consideran que la producción constante de maíz grano que México ha mantenido en la última década se debe al incremento en la eficiencia productiva, sobre todo de las áreas de riego, que compensa la baja productividad por superficie sembrada de las áreas de secano.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

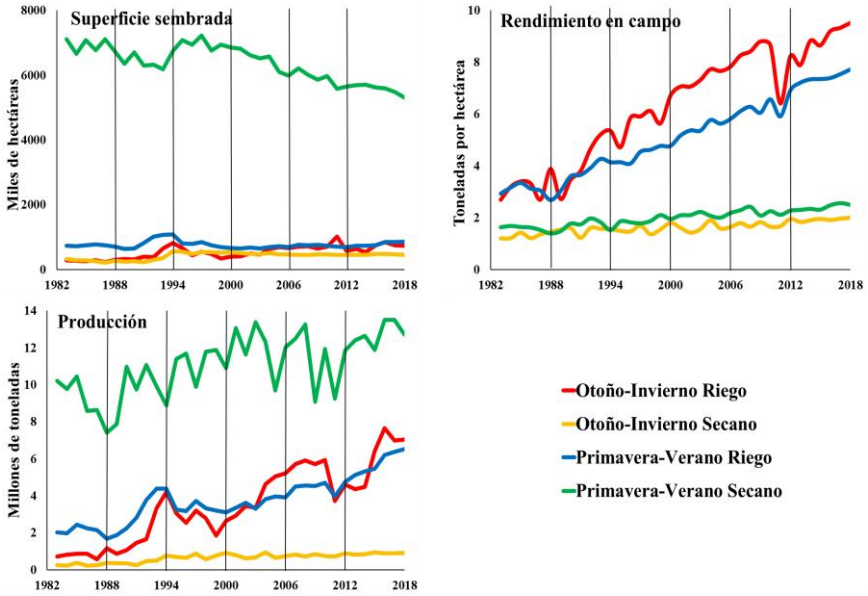


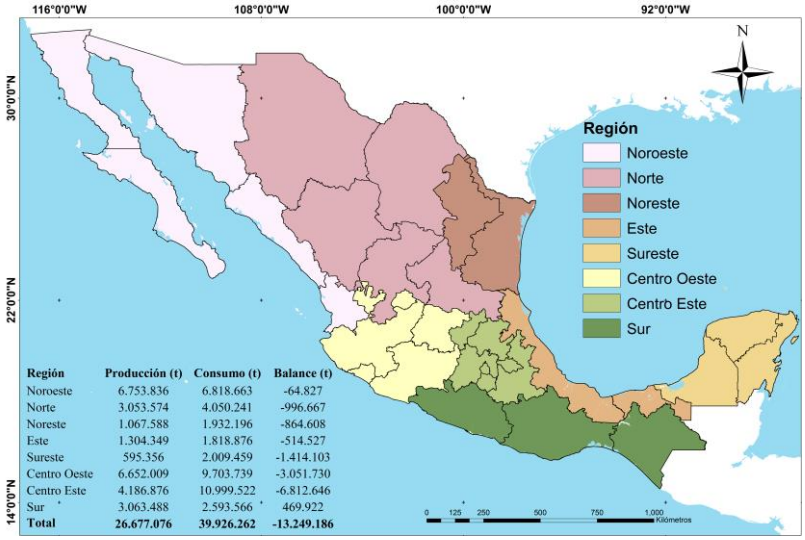
Figura 11. Evolución temporal de la superficie sembrada, rendimiento en campo y producción de maíz grano en México de 1983 a 2018, por ciclo de producción y régimen hídrico.

Para determinar las regiones en México con los mayores déficits entre producción y consumo, se empleó la clasificación propuesta por Mendoza-Vargas (2017), que divide al país en ocho zonas económicas en base a la existencia de recursos naturales que permiten determinadas actividades productivas y el grado de desarrollo de las fuerzas de producción. El Centro Este (6,81 millones de t, que representan el 51,65% del déficit nacional), Centro Oeste (2,99 millones de t, 22,68%) y Sureste (1,41 millones de t, 10,72%) resultaron ser las zonas con el mayor déficit de maíz grano, entre las tres regiones sumaron el 85,05% del déficit nacional (**Figura 12**).

De acuerdo con INEGI (2020) el mayor déficit de maíz grano que muestra la región Centro Este (51,65% del déficit nacional) se debe a dos factores: es la región con el mayor número de habitantes en zonas urbanas (33,81% del total nacional) y mayormente presenta actividad industrial, no agrícola. En contraste, la región Sur resultó ser la única zona en el país sin déficit; esta zona se caracteriza por contener la mayor

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

diversidad de razas nativas de maíz, con los niveles más altos de población indígena (rural), además de ser una región con agricultura de autoconsumo y sistemas de producción rudimentarios que dependen de las lluvias en verano (Ureta *et al.*, 2013; Perales, y Golicher, 2014). Las diferencias demográficas y económicas entre ambas regiones ponen de manifiesto la capacidad de las zonas rurales de producir su propio alimento, por lo que el reto es ¿cómo alimentar a las ciudades? (Sosa-Baldivia y Ruíz-Ibarra, 2017; Palacios-Argüello *et al.*, 2017).



Región	Producción (t)	Consumo (t)	Balance (t)
Noroeste	6.753.836	6.818.663	-64.827
Norte	3.053.574	4.050.241	-996.667
Noreste	1.067.588	1.932.196	-864.608
Este	1.304.349	1.818.876	-514.527
Sureste	595.356	2.009.459	-1.414.103
Centro Oeste	6.652.009	9.703.739	-3.051.730
Centro Este	4.186.876	10.999.522	-6.812.646
Sur	3.063.488	2.593.566	469.922
Total	**26.677.076**	**39.926.262**	**-13.249.186**

Figura 12. Balance agroalimentario entre producción y consumo de maíz grano en México por región económica de 2013 a 2018.

4.4.3 Productividad de maíz grano en México

Al analizar la producción de maíz grano en México de 1983 a 2018 mediante un análisis de separación de medias por Tukey, se encontró un incremento continuo significativo en cada sexenio, como resultado de una mejora en los rendimientos de campo que compensó la reducción de la superficie sembrada (**Tabla 9**). Sin embargo, al utilizar el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción propuesto por Gómez-Oliver (1994), la aparente eficiencia en el sistema de producción no consideró que el crecimiento de la productividad de maíz grano entre sexenios presentó una tendencia decreciente, al pasar

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

de un 16,4 % en 1995-2000 comparado con 1989-1994 a un 6,9 % en 2013-2018 comparado con 2007-2012 (**Tabla 10**).

De acuerdo con Sánchez-Cano (2014) y Hernández-Hernández *et al.* (2016) el crecimiento de 1983 a 2000 se explica por el fortalecimiento de las políticas de apoyo centralizado en la producción agrícola, la investigación tecnológica, los precios de garantía, el uso de variedades mejoradas y fertilizantes, apoyos para la comercialización, el crédito y el seguro agrícola. El descenso en la productividad a partir del año 2001 coincidió con una etapa de políticas de apoyo al campo en forma descentralizada, en la que el sector privado participó en los cambios tecnológicos, la investigación, la difusión y la promoción del uso de insumos; y en la que los productores tomaron sus propias decisiones sobre el destino de los subsidios aportados por el gobierno (Hernández-Hernández *et al.*, 2016). Al respecto, Soto *et al.* (2006) encontraron que la competitividad agrícola de los sistemas de producción locales y de subsistencia se fortalece a medida que el gobierno establece mecanismos de seguimiento y evaluación, debido a que en la mayoría de casos los productores canalizan parte de los subsidios como complemento del ingreso familiar.

Tabla 9. Prueba de medias por Tukey para los indicadores de campo de la producción de maíz grano en México de 1983-2018.

Periodos	**Superficie Sembrada (ha)**	**Producción (t)**	**Rendimiento (t ha^{-1})**
1983-1988	8.188.027,00 ab	12.364.635,33 e	1,78 e
1989-1994	8.109.741,50 b	15.521.672,50 d	2,13 d
1995-2000	8.718.844,07 a	17.958.842,95 c	2,36 d
2001-2006	8.164.037,21 ab	20.508.540,40 b	2,80 c
2007-2012	7.794.831,34 bc	21.845.399,47 b	3,19 b
2013-2018	7.530.565,02 c	25.635.653,36 a	3,55 a

Medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$)

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 10. Análisis de la productividad de maíz en México de 1983 a 2018 obtenido mediante el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción.

Periodos		Crecimiento* (%)	Factores del crecimiento (%)		
Inicial	Final		Superficie Sembrada	Rendimiento	Interacción
1983-1988	1989-1994	15,4	-0,8	16,4	-0,2
1989-1994	1995-2000	16,4	6,3	9,4	0,7
1995-2000	2001-2006	9,8	-5,7	16,6	-1,1
2001-2006	2007-2012	8,0	-4,2	12,8	-0,6
2007-2012	2013-2018	6,9	-3,2	10,5	-0,4

*Crecimiento (%) = Superficie Sembrada (%) ± Rendimiento (%) ± Interacción (%)

En 2013-2018 la productividad de maíz grano a nivel nacional tuvo un crecimiento del 6,9% respecto de 2007-2012, como respuesta a un incremento en la eficiencia de los rendimientos en campo (10,5%) (**Tabla 10**). Al analizar la productividad de maíz grano por Estados, se encontró que 20 de los 32 Estados tuvieron un crecimiento, de los cuales 11 se manejaron bajo un régimen hídrico de secano y 9 bajo riego (**Tabla 11**).

Villegas *et al.* (2018) consideran que el crecimiento en la productividad de maíz grano de las áreas de secano se explica por la inclusión de programas federales como MasAgro que desarrolló estrategias regionales de intensificación sustentable de producción de maíz, mediante redes de innovación compuestas por plataformas de investigación, módulos demostrativos y áreas de extensión donde se evaluaban, desarrollaban y adaptaban tecnologías y prácticas agronómicas sostenibles, que promovían el uso de semillas mejoradas de maíz (Sánchez-Toledano *et al.*, 2017). Carpentieri-Pípolo *et al.* (2010) y Sales-Rocha *et al.* (2019) encontraron que las razas de maíz nativas que se cultivan en un sistema tradicional tienden a sobresalir, en comparación con variedades comerciales en el largo plazo, debido a que las razas nativas tienen genotipos capaces de responder mejor al estrés abiótico y biótico, proporcionando una mayor estabilidad del rendimiento.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Sin embargo, Murray-Tortarolo *et al.* (2018) encontraron que las áreas de secano con producción de maíz grano en México son las más vulnerables a los efectos del clima futuro. Este escenario es especialmente crítico debido a que 9 de los 12 Estados que presentaron reducciones en su productividad se manejan bajo secano (categorías D, E y F). Los Estados que redujeron su productividad se localizan en su mayoría del centro al sur del país (**Tabla 11**), en la región económica Sur (Mendoza-Vargas, 2017), donde actualmente no se presenta déficit entre producción-consumo y donde se concentra la mayor diversidad de maíces nativos y población indígena (Ureta *et al.*, 2013; Perales, y Golicher 2014).

La reducción en productividad de maíz grano de 12 Estados (categorías D, E y F) representó, para el periodo 2013-2018, el 45,10% de la superficie sembrada, con una producción del 26,90% del total nacional, y con rendimientos en campo promedios de 2,15 t ha^{-1}. Por el contrario, 8 Estados (Categoria C) produjeron el 52,45% del total nacional en el 31,28% de la superficie sembrada, con rendimientos en campo superiores a las 10 t ha^{-1} (**Tabla 11**).

El aumento en la productividad de maíz grano de los Estados ubicados en la categoría C se debió a que lograron hacer más eficientes sus rendimientos en campo, pues sus superficies sembradas decrecieron. Dos factores explican el incremento en los rendimientos en campo, el uso de semillas mejoradas de maíz (Villegas *et al.*, 2018) y el empleo de riego (Juárez-Hernández y Pardo, 2020), ya sea en su totalidad, como el caso de Sinaloa (principal productor de maíz en México), o con riegos que auxilian las lluvias de verano (secano) en Jalisco (segundo productor) y Estado de México (tercer productor).

Sin embargo, dos Estados referentes en la producción de maíz grano a nivel nacional presentaron reducción en su productividad, Guanajuato (quinto productor, categoría D) y Chiapas (7, F), lo que compromete el 11,1% de la producción nacional (**Tabla 11**). La baja en productividad que mostró Guanajuato se debió a la reducción de sus rendimientos en campo, por la fuerte competencia por el uso del agua con otros cultivos cíclicos como las frutillas y hortalizas (García-Rodríguez *et al.*, 2019). Para el caso de Chiapas, la reconversión de las

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

áreas maiceras a cultivos más rentables explica por qué se ha reducido tanto la superficie sembrada como los rendimientos en campo (Pérez-Pérez y Villafuerte-Solís, 2019).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 11. Productividad de maíz grano por Estado en el periodo 2013-2018 respecto del periodo 2007-2012 obtenida mediante el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción.

Estado	Crecimiento (%)	Factores del crecimiento (%)			Tipología	Productividad en % para el periodo 2013-2018				Régimen Hidrico*	Región económica
		Superficie Sembrada	Rendimiento en campo	Interacción		Superficie Sembrada	Producción	Rendimiento en campo	Lugar		
Baja California	97,4	3,4	40,5	53,5	A	0,01	0,02	7,78	32	Riego	Noroeste
Baja California Sur	41,3	29,6	7,8	3,9	A	0,09	0,16	6,59	29	Riego	Noroeste
Campeche	23	11,3	10,2	1,5	A	2,47	1,77	2,50	14	Secano	Sureste
Coahuila	18,4	9,3	8,2	0,9	A	0,41	0,14	1,27	30	Riego	Norte
Michoacán	17,2	0,2	17	0	A	6,32	7,29	4,15	4	Secano	Centro Oeste
Quintana Roo	26	6,1	18,4	1,5	A	1,00	0,22	0,89	27	Secano	Sureste
Sonora	24,3	1,5	22,4	0,4	A	0,42	0,89	7,13	19	Riego	Noroeste
Tamaulipas	30	11,9	15,5	2,6	A	2,48	3,26	4,78	11	Riego	Noreste
Tlaxcala	19	1,9	16,7	0,4	A	1,62	1,40	2,93	16	Secano	Centro Este
Veracruz	3,9	0,6	3,3	0	A	7,66	4,84	2,21	8	Secano	Este
Morelos	3,6	5,9	-2,2	-0,1	B	0,40	0,38	3,18	24	Secano	Centro Este
Nuevo Leon	24,4	78,6	-26,6	-27,6	B	0,74	0,28	1,45	25	Secano	Noreste
Colima	15,4	-9	27,3	-2,9	C	0,16	0,18	4,01	28	Secano	Centro Oeste
Chihuahua	21	0	21	0	C	2,91	5,30	6,26	6	Riego	Norte
Durango	15,6	-2,5	18,7	-0,6	C	2,24	1,36	2,16	17	Riego	Norte
Hidalgo	6,3	-2,4	8,9	-0,2	C	3,29	2,72	2,91	12	Riego	Centro Este
Jalisco	10,6	-5,5	17,1	-1	C	7,57	14,07	6,37	2	Secano	Centro Oeste

Tabla 11 (continuación). Productividad de maíz grano por Estado en el periodo 2013-2018 respecto del periodo 2007-2012 obtenida mediante el modelo de descomposición de factores del crecimiento de la producción.

Estado de México	24,6	-3,4	29,3	-1,3	C	7,01	8,05	3,97	3	Secano	Centro Este
Sinaloa	0,2	-10,6	12,1	-1,3	C	7,02	20,23	10,09	1	Riego	Noroeste
Tabasco	3,8	-6,2	10,7	-0,7	C	1,08	0,55	1,84	22	Secano	Este
Guanajuato	-4,2	0,2	-4,4	0	D	5,26	6,20	4,07	5	Riego	Centro Oeste
Guerrero	-3,9	0,1	-4	0	D	6,36	4,72	2,69	9	Secano	Sur
Oaxaca	-6,5	-8,1	1,7	-0,1	E	7,37	2,63	1,29	13	Secano	Sur
Puebla	-4,4	-8,7	4,7	-0,4	E	7,21	3,90	1,89	10	Secano	Centro Este
Yucatán	-14,9	-23,8	11,2	-2,3	E	1,60	0,41	0,92	23	Secano	Sureste
Zacatecas	-28,9	-29,9	1,3	-0,3	E	2,69	1,48	1,97	15	Secano	Norte
Aguascalientes	-112,2	-19,9	-101,9	9,6	F	0,53	0,27	1,90	26	Riego	Centro Oeste
Chiapas	-14,4	-0,8	-13,7	0,1	F	9,17	4,90	1,86	7	Secano	Sur
Ciudad de México	-54,2	-49,7	-6,6	2,1	F	0,05	0,02	1,34	31	Secano	Centro Este
Nayarit	-32,8	-27,7	-6,4	1,3	F	0,50	0,59	4,12	21	Secano	Noroeste
Querétaro	-15,3	-7,3	-8,5	0,5	F	1,43	1,14	2,76	18	Riego	Centro Este
San Luis Potosí	-12,1	-4,1	-8,3	0,3	F	2,95	0,64	1,06	20	Secano	Norte

*Los Estados se categorizaron en secano o riego en función de la mayor superficie sembrada por régimen hídrico de 2013 a 2018.

4.4.4 Indicadores de adopción de maíz OGM

Al sumar la producción anual en t por municipio de 1983 a 2018 por ciclo de producción PV y OI, y agrupar esta producción en intervalos de clase (muy baja, baja, media, alta y muy alta), se encontró que las principales regiones productoras de maíz grano en el ciclo PV se localizaron en los estados de Jalisco y Chiapas, mientras que para el ciclo OI se ubicaron en Sinaloa y Tamaulipas. En estas regiones se aplicaron un total de 141 encuestas a productores clave, Jalisco (45), Chiapas (33), Sinaloa (36) y Tamaulipas (27), para determinar los factores que condicionan la adopción de maíz OGM en México (**Figura 13**).

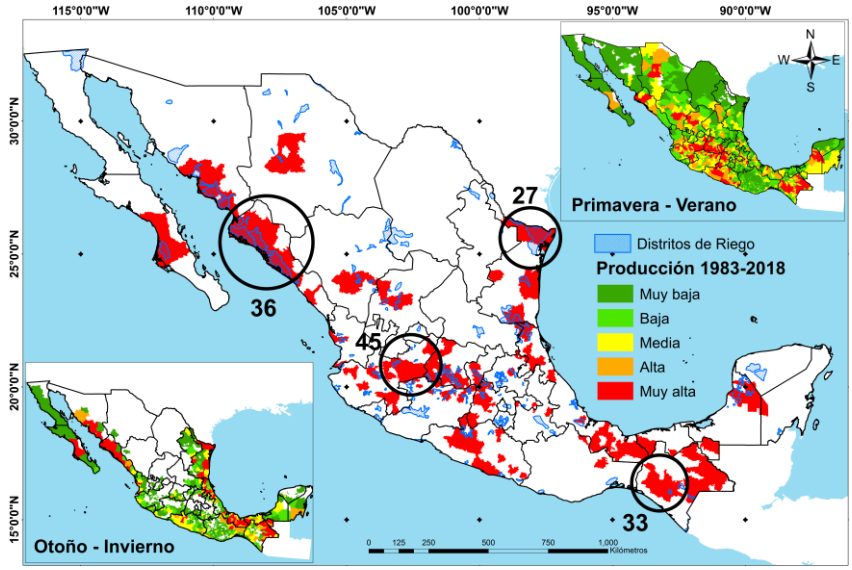


Figura 13. Principales zonas productoras de maíz en México de 1983 a 2018 obtenidas de la suma de producción a nivel municipal en los ciclos primavera-verano y otoño-invierno. Los círculos indican las regiones donde se aplicaron encuestas a productores clave: Jalisco (45), Chiapas (33), Sinaloa (36) y Tamaulipas (27).

Mwangi y Kariuki (2015) encontraron que los factores que condicionan la adopción de nuevas tecnologías en los sistemas de producción de los pequeños productores agrícolas están asociados con la edad,

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

escolaridad, tamaño de la parcela e importancia que representa la actividad en el ingreso familiar. Al caracterizar a los productores de las principales regiones productoras de maíz grano en México, se encontró que el tamaño de las parcelas y el porcentaje que representa la actividad para el ingreso familiar (IF) parecen condicionar la adopción de maíz OGM (**Tabla 12**).

El 56% de los productores contestaron estar dispuestos a adoptar maíz OGM, sobre todo en aquellas regiones que se manejan con riego (Sinaloa y Tamaulipas), el restante 44% sustentó su negativa en las condiciones ambientales (secano) de sus áreas de producción (Jalisco y Chiapas). El 94% del total de productores dijo ser consciente de que el empleo de variedades transgénicas incrementa los costos de producción. Noriero-Escalante y Massieu-Trigo (2018) encontraron que las regiones con producción comercial de maíz son más propensas a la adopción de maíz OGM porque el incremento en sus costos de producción es menos significativo que en las áreas con producción para autoconsumo.

González-Estrada y Alferes-Varela (2010) encontraron que los principales problemas del cultivo de maíz en México están asociados con la baja productividad por superficie sembrada, un problema que el maíz OGM no resuelve, puesto que el incremento en los rendimientos de campo no es económicamente rentable respecto al incremento en los costos de producción (Chauvet y Lazos, 2014). Hernández-Hernández *et al.* (2016) encontraron que el potencial económico y agronómico de la adopción de semillas de maíz genéticamente modificado en México ha sido inviable porque las semillas mejoradas propuestas resuelven problemas relacionados con resistencia al glifosato y gusano cogollero, factores que históricamente no han sido un problema en la producción de maíz grano en México.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 12. Caracterización socioeconómica de los productores en las principales regiones productoras de maíz en México de 1983 a 2018.

Región	n	Años			Superficie (ha)		Rendimiento (t ha^{-1})		% IF	Adopción OGM (%)	
		Edad	Estudios	Experiencia	O-I	P-V	O-I	P-V		Si	No
Sinaloa	36	57 a	9 a	37 a	8,38 a	1,76 bc	8,68 a	1,63 b	87 a	84	16
Jalisco	45	47 c	11 a	17 c	2,27 b	6,21 a	7,79 a	2,12 a	52 c	56	44
Tamaulipas	27	53 b	9 a	23 b	3,67 b	1,19 c	4,53 b	1,36 c	69 b	72	28
Chiapas	33	50 b	6 b	25 b	0,51 c	2,86 b	3,48 b	1,67 b	49 c	12	88
Media		52	9	26	3,71	3,01	6,12	1,69	64	56	44

n = Número de encuetas. % IF = % que representa la actividad para el ingreso familiar. Medias con la misma letra por columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0,05$).

5. CAPÍTULO III. DELIMITACIÓN ESPACIAL DE CENTROS DE DIVERSIDAD DE MAÍZ (*Zea mays*) EN MÉXICO

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

5. CAPÍTULO III. DELIMITACIÓN ESPACIAL DE CENTROS DE DIVERSIDAD DE MAÍZ (*Zea mays*) EN MÉXICO [3]

5.1 RESUMEN

México, como centro de origen del maíz, presenta una elevada diversidad de razas de maíz. Con el objetivo de delimitar espacialmente regiones con una alta concentración de diversidad intraespecífica en México, como una medida fundamental para la conservación *in situ* de su agrobiodiversidad, se han utilizado herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar índices de diversidad y riqueza para 64 razas de maíz cultivadas en México, usando índices relacionados con factores ambientales como temperatura, precipitación y altitud, la presencia de grupos indígenas y el tipo de uso del maíz para delimitar. Estas relaciones permitieron definir espacialmente siete unidades ambientales con las razas de maíz características en cada una de ellas, constituyendo áreas prioritarias para la conservación *in situ*.

[3] Santillán-Fernández, A.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Bautista-Ortega, J.; Pereira-Lorenzo, S. Spatial Delimitation of Genetic Diversity of Native Maize and Its Relationship with Ethnic Groups in Mexico. *Agronomy* **2021**, *11*, 672. https://doi.org/10.3390/agronomy11040672

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Además, se encontró una estrecha relación entre la diversidad de razas de maíz y la de grupos étnicos, desde el centro del país hacia el sur, asociada con las diferencias en el uso del maíz en diferentes grupos indígenas. Esta delimitación geográfica de razas y usos del maíz favorecerá la seguridad alimentaria mediante medidas específicas de conservación *in situ*, así como un aumento del valor añadido de los derivados del maíz basados en razas de maíz específicas preservados por las etnias locales.

Palabras Clave: *Zea mays* L., diversidad de cultivos, razas de maíz, diversidad intraespecífica.

5.2 INTRODUCCIÓN

México es considerado el centro de origen del maíz (*Zea mays* L.) y alberga una gran diversidad de razas de maíz, cada una adaptada a diferentes condiciones ambientales y sistemas agrícolas (Ruiz-Corral *et al.*, 2008; Dyer y Taylor, 2008). Estas razas se cultivan en una amplia gama de altitudes, desde el nivel del mar hasta alrededor de los 3000 msnm, y regímenes de precipitación anuales, desde valores inferiores a 400 mm a más de 3000 mm. Como resultado de la adaptación al medio, las razas de maíz varían en tamaño de planta y en tolerancia al calor, frío y necesidades de agua (Ureta *et al.*, 2013).

En México se cultivan alrededor de 64 razas de maíz (CONABIO, 2011), lo que representa el 60% de la diversidad del maíz en el mundo (Ruiz-Corral *et al.*, 2008). La importancia del maíz para la población mexicana ha sido ampliamente descrita desde varios puntos de vista, como centro de origen (Matsuoka *et al.*, 2002; Kato, 2005 Caballero-García *et al.*, 2019), centro de domesticación (Piperno *et al.*, 2009; Hufford *et al.*, 2012), alimento básico (Fernández-Suárez *et al.*, 2013), e incluso como un factor que ha permitido el desarrollo de grupos étnicos (Perales *et al.*, 2005; Ureta *et al.*, 2013).

El análisis de la diversidad en los centros de origen es crucial para la conservación *in situ* de la especie (Brush, 1995; Thrupp, 2000; Esquinas-Alcázar, 2005; Bardsley y Thomas, 2005). Sin embargo, los estudios a nivel nacional para identificar áreas prioritarias para la

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

conservación *in situ* de los recursos genéticos del maíz en México son escasos (Van Etten *et al.*, 2008; FAO, 2012). La mayoría de los estudios se han centrado en la conservación *ex situ* mediante la creación de bancos de germoplasma y se han limitado a describir la distribución geográfica de las razas (Brush, 1995; CONABIO, 2011). Los estudios sobre la interacción entre los factores ambientales, socioculturales y económicos que más impactan en los sistemas de producción agrícola del maíz, también son limitados (Ureta *et al.*, 2013; Perales y Golicher 2014; Orozco-Ramírez *et al.*, 2016a, b).

La identificación de áreas prioritarias de conservación *in situ* puede ayudar a planificar mejor las actividades agrícolas y disminuir la vulnerabilidad de la producción ante amenazas ambientales (Bellon *et al.*, 2011; Mercer *et al.*, 2012; Ureta *et al.*, 2013); también contribuye a satisfacer necesidades culturales o sociales específicas e incluso frenar la adopción de nuevas tecnologías como los organismos genéticamente modificados que comprometen la diversidad de la especie (Serratos-Hernández *et al.*, 2004; Schröder y Schmidt, 2012; Lazos-Chavero 2014).

Dyer *et al.* (2014) encontraron evidencia de pérdida de razas de maíz en México, por lo que sugirieron que la reducción de la diversidad podría dificultar a los agricultores la selección de razas adaptadas a la variación climática actual, reduciendo los rendimientos en campo; estas pérdidas en el rendimiento llevarían, a su vez, a los agricultores a abandonar el sector y, por lo tanto, a una mayor pérdida de diversidad del maíz en México.

Hijmans *et al.* (1999) y Guarino *et al.* (2002) sugieren que, para preservar la diversidad de especies, el análisis espacial usando Sistemas de Información Geográfica (SIG) puede ser una buena herramienta cuando se vinculan diferentes tipos de información de naturaleza espacial y temporal, como se muestra en estudios sobre papa (Hijmans *et al.*, 2000), papaya (Scheldeman *et al.*, 2007), mandioca (Willemen *et al.*, 2007) y más recientemente en maíz (Ureta *et al.*, 2013; Perales y Golicher, 2014; Orozco-Ramírez *et al.*, 2016a, b; Caballero-García *et al.*, 2019); particularmente cuando se incorporan índices de riqueza y diversidad analizados desde un enfoque territorial, que permitan

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

delimitar áreas prioritarias para la conservación de la agrodiversidad del maíz (Ureta *et al.*, 2013).

Recientemente, Perales y Golicher (2014), Orozco-Ramírez *et al.* (2016a) y Caballero-García *et al.* (2019) analizaron la variación geográfica en la diversidad del maíz en México utilizando indicadores de riqueza y diversidad. Sin embargo, en sus trabajos no evaluaron la diversidad intraespecífica, ni la relación de los pueblos indígenas con la diversidad territorial de las razas y usos específicos del maíz.

Para resolver este problema, en este trabajo nos plantemos como objetivo delimitar regiones con una alta concentración de diversidad intraespecífica de maíz en México, mediante herramientas SIG que relacionaran factores ambientales como la temperatura, la precipitación y la altitud; con la presencia de grupos indígenas; y, finalmente, los tipos de uso del maíz. La hipótesis de partida es que la diversidad de las razas de maíz está asociada con la diversidad territorial de los pueblos indígenas, contribuyendo en el proceso de domesticación, con usos específicos por razas. Esta delimitación geográfica de las razas y los usos del maíz favorecerá la seguridad alimentaria mediante medidas específicas de conservación, así como un aumento del valor añadido de los derivados del maíz basados en razas de maíz específicas preservadas por las etnias locales.

5.3 MATERIALES Y MÉTODOS

5.3.1 Base de datos

En este trabajo se incluyeron 18.812 registros georreferenciados de 64 razas de maíz cultivadas en México y 1570 de su pariente silvestre teocinte (Sánchez-González *et al.*, 2018), integrados en una base de datos disponible en el sitio web de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2011). Los 20382 registros cuentan con un identificador que los agrupa en razas de maíz y teocinte (**Figura 14**), según el año de colecta (desde 1927 hasta 2010), según los usos del maíz (diferenciando grano y planta) y según las coordenadas geográficas (longitud, latitud).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

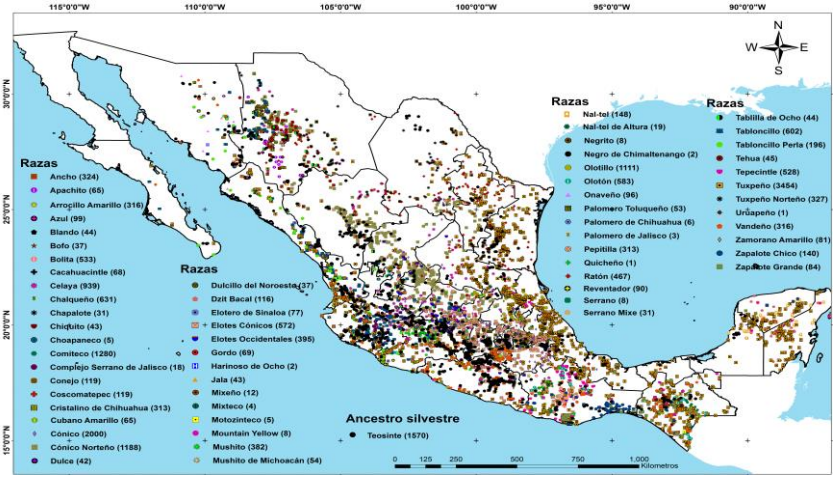


Figura 14. Distribución espacial de las razas de maíz en México y su pariente silvestre Teocinte. Entre paréntesis se indica el número de registros por raza.

5.3.2 Delimitación espacial de las regiones de riqueza genética por raza de maíz

La metodología empleada para la determinación de las zonas de riqueza genética se basó en el análisis espacial de la distribución geográfica de las colectas de las 64 razas de maíz. Para ello se agruparon las colectas por raza y se modeló su zona de riqueza genética en el programa Diva Gis v7,5 (Hijmans *et al.*, 2001) con el módulo Analysis / Point to Grid / Richness. En el caso de las razas con poca representatividad (menos de 30 colectas) se generaron zonas de amortiguamiento de 5 km de radio a cada colecta, por considerar que existe alta probabilidad de que el material genético colectado se encuentre distribuido en esa área (Viner y Arritt, 2010).

La zona de riqueza para las razas con más de 30 colectas se calculó raza por raza y consistió en dividir el mapa del país en cuadrículas de cinco min (0,083 grados sexagesimales) con una vecindad de un grado sexagesimal que equivale a un área de 9 km por 9 km, tamaño recomendado por Scheldeman *et al*. (2007) para estudios de índole nacional. DivaGis hace un conteo del número de colectas en cada cuadrícula y agrupa las cuadrículas en cinco intervalos de clase según

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

el número de observaciones presentes. Para los fines de este trabajo se tomaron los cuatro intervalos de clase con mayor número de observaciones.

De acuerdo con la metodología descrita para la *determinación de centros de origen y centros de diversidad genética de maíz en México* (CONABIO, 2007), las regiones generadas por las zonas de amortiguamiento para las colectas de las razas con menos de 30 observaciones y las zonas de riqueza para las razas con más de 30 observaciones se intersectaron con los registros de parientes silvestres (teocinte) y se discriminaron aquellas regiones sin presencia de parientes silvestres. A las regiones resultantes se le denominó *región de riqueza genética.*

5.3.3 Delimitación espacial de la diversidad intraespecífica de maíz

Para determinar la diversidad espacial intraespecífica de las 64 razas de maíz cultivadas en México se empleó la distribución geográfica de sus colectas y se modelaron índices de riqueza específica y de estructura en el programa DivaGis v7,5 (Hijmans *et al.*, 2001) con el módulo Analysis / Point to Grid / Diversity. Para el cálculo de los índices se dividió el mapa del país en cuadrículas de cinco min (0.083 grados sexagesimales) con una vecindad de un grado sexagesimal que equivale a un área de 9 km por 9 km (Scheldeman *et al*., 2007).

Los índices de riqueza específica que se calcularon fueron los de Margalef y Menhinick que midieron el número de razas presentes por cuadrícula (9 km por 9 km) sin considerar la abundancia proporcional de sus colectas (Diker *et al*., 2004). Para los índices de estructura se calcularon los de Shannon, Brillouin y Simpson, que a diferencia de los índices de riqueza especifica si consideraron la proporción del número de colectas por raza de maíz dentro de la cuadrícula (Diker *et al*., 2004).

De acuerdo al índice empleado, DivaGis hace un conteo del número de razas en cada cuadrícula y agrupa las cuadrículas en cinco intervalos de clase ordenados de manera ascendente por el número de razas presentes (Hijmans *et al.*, 2001 y 2005). Para simplificar la

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

interpretación de los resultados, los cinco intervalos de clase por índice fueron recategorizados como diversidad muy baja (que correspondió al intervalo de clase 1), baja (intervalo de clase 2), media (3), alta (4) y muy alta (5).

Para fines de este trabajo se tomaron en cuenta las áreas comunes con diversidad media, alta y muy alta de los índices de riqueza específica (Margalef y Menhinick) e índices de estructura (Shannon, Brillouin y Simpson) que fueron delimitadas mediante un proceso de intersección de mapas en DivaGis v7.5 (Hijmans *et al.*, 2001). A los polígonos resultantes se les denominó regiones con diversidad intraespecífica de maíz.

5.3.4 Delimitación espacial del centro de diversidad de maíz

CONABIO (2007) define a los centros de diversidad como aquellas regiones en las que coexisten poblaciones de parientes silvestres con poblaciones de las razas o variedades de la especie cultivada. En este estudio se definió espacialmente el centro de diversidad de maíz a partir de la unión de las regiones georreferenciadas de: a) riqueza genética, b) diversidad intraespecífica, y c) centros de origen y domesticación del maíz descritos por Kato *et al.* (2009) para México.

5.3.5 Caracterización del centro de diversidad de maíz por factores climáticos

En virtud de que el centro de diversidad de maíz identificado abarca diferentes regiones de México, cada una con distintos patrones climáticos que le confieren características especiales a las razas de maíz que en esas regiones se cultivan (Ruíz-Corral *et al.*, 2008), se decidió hacer una regionalización para diferenciar las condiciones climáticas en el interior del centro de diversidad. Para ello se combinó la capa geográfica del centro de diversidad con capas geográficas de altitud (msnm), precipitación media anual (mm), temperatura media anual (°C) y régimen de temperatura (con categorías desde muy seco hasta muy húmedo) disponibles en el geoportal de CONABIO (2001). Las capas geográficas se combinaron con la herramienta *intersect* del software

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

GvSIG v2.3.1 (Anguix y Díaz, 2008), de acuerdo a la *Metodología de Unidades Ambientales* de Gómez-Orea (1994).

5.3.6 Relación de las unidades ambientales con los grupos étnicos y usos del maíz

Una vez caracterizadas las unidades ambientales por factores climáticos, se identificaron las principales razas de maíz cultivadas en cada una de ellas. Para ello se contabilizó el número de colectas por raza de maíz en cada unidad ambiental y se obtuvo el porcentaje que representa del total por raza. Se consideraron como razas principales para una unidad ambiental aquellas cuyo porcentaje de colectas en la unidad ambiental fuera el mayor con respecto a las otras unidades ambientales. Para aquellos casos donde alguna raza presentó porcentajes superiores al 10% en dos o más unidades ambientales, se consideró como raza secundaria.

Una vez determinadas las principales razas por unidad ambiental, se asociaron territorialmente los grupos étnicos y los usos del maíz (diferenciando grano y planta) en cada unidad ambiental. La distribución espacial de los grupos étnicos en México se obtuvo de la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (Serrano-Carreto, 2006). Para el caso de los usos del maíz se definieron 11 variantes para el grano y 4 para la planta conforme la información disponible en la base de datos de CONABIO (2011) (**Tabla 13**).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 13. Descripción de los principales usos del grano y planta de las 64 razas de maíz nativas cultivadas en México.

Usos	Descripción
Elote (A)	Mazorca tierna que se hierve y se prepara calientita, con queso, mayonesa, limón y chile piquín.
Esquite (B)	Granos de elote fritos en aceite o hervidos con chile de árbol, epazote y cebolla. Son servidos con sal, limón, chile piquín, mayonesa y queso.
Nixtamal (C)	Proceso mediante el cual se realiza la cocción del maíz con agua y cal viva, para después ser molido y dar origen a la masa nixtamalizada que se utiliza para la preparación de diferentes platillos.
Pozole (D)	Es un caldo hecho a base de granos de maíz, al que se agrega carne de pollo o cerdo como ingrediente secundario.
Pozol (E)	Bebida espesa a base de cacao y maíz que se consume principalmente en el sur de México.
Tamal (F)	Alimento hecho de masa nixtamalizada rellena de carnes, vegetales, chiles, frutas, salsas y otros ingredientes. Se envuelve en hojas vegetales y es cocida en agua o al vapor.
Tortilla (G)	Alimento de forma plana y circular elaborado de masa nixtamalizada que se cocina al fuego y se come sola o rellena con diversos ingredientes.
Atole (H)	Bebida dulce de maíz en agua que se cocina con moderada viscosidad y que se sirve lo más caliente posible.
Pinole (I)	Harina de maíz tostado que se endulza para ser consumida como dulce o bien para preparar bebidas frías y calientes.
Tejuino (J)	Bebida fermentada de maíz que se consume principalmente en el norte de México
Repostería (K)	Elaboración de galletas, pan casero y pasteles a base de granos de maíz dulce.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 13 (continuación). Descripción de los principales usos del grano y planta de las 64 razas de maíz nativas cultivadas en México.

Forraje (L)	La planta de maíz sirve como alimento principalmente de animales rumiantes, ya sea una vez que la planta se ha secado, o se pica y ensila en verde. Es común que el grano de maíz también se emplee como forraje.
Combustible (M)	En algunas regiones rurales de México, la planta de maíz seca sustituye al gas natural o leña de árboles como combustible para generar fuego que es empleado en la cocción de alimentos.
Totomoxtle (N)	Hojas secas, rugosas y quebradizas que envuelven la mazorca del maíz. Por su resistencia se emplean para envolver tamales.
Abono (O)	Los residuos que quedan de la planta del maíz una vez cosechado grano y planta, se incorporan al suelo como materia orgánica.

Elaboración propia a partir de lo reportado en CONABIO (2011) y Fernández-Suárez *et al.* (2013). De A a K corresponden a usos del grano. De L a O corresponden a usos de la planta de maíz.

Finalmente, para determinar la relación que los pueblos indígenas en México han tenido en el proceso de domesticación del maíz se asoció el número de grupos étnicos en cada unidad ambiental con el respectivo número de colectas, número de razas, número de razas principales, y número de usos del maíz (grano y planta). Para ello se calculó el coeficiente de correlación de Pearson en el software estadístico R (Team, 2013).

En el caso del número de usos del maíz (grano y planta) en cada unidad ambiental, se construyó de manera heurística un índice de usos para las razas principales, cuyos límites matemáticos estuvieron en el intervalo $[0,1]$. Teóricamente el valor 0 implica que de los 15 usos probables según CONABIO (2011), ninguna de las razas principales en la unidad ambiental es usada; por el contrario, el valor 1 solo se puede obtener si la unidad ambiental contiene el total de razas principales (64) y cada una de ellas se emplea en los 15 usos posibles.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Para la creación del índice se recategorizó como 1 si la raza principal en la unidad ambiental presentó el uso correspondiente y 0 en caso contrario. La expresión matemática quedo de la siguiente manera:

$$\mathbf{IU_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{15} \mathbf{U_{jk}}}{(\mathbf{64})(\mathbf{15})} \qquad i = 1,..,7; j = 1,\dots,n_i; k = 1,\dots,15$$

Donde

$IU_i =$ Indice de Usos para la unidad ambiental i

$U_{jk} =$ Valor dado para el uso k de la raza principal j en la unidad ambiental i

$n_i =$ Número de razas principales en la unidad ambiental i

5.4 RESULTADOS

5.4.1 Delimitación espacial de las regiones de riqueza genética por raza de maíz

Un análisis de la base de datos con 18.812 colectas de las 64 razas de maíz cultivadas en México permitió identificar 49 razas con más de 30 registros y 15 razas con menos de 30 registros. Conforme la metodología planteada en este estudio se delimitó la región de riqueza genética para cada raza con más de 30 colectas (**Figura 15**) y para aquellas razas con menos de 30 colectas se generó una zona de amortiguamiento para cada colecta de 5 km de radio (**Figura 16**).

Para la suma de las regiones generadas de las 64 razas cultivadas en México se verificó la presencia del pariente silvestre teocinte, descartándose aquellas regiones sin presencia de teocinte (**Figura 17**). A las regiones resultantes se las denominó regiones de riqueza genética, cuya distribución geográfica abarcó amplias zonas de México, con mayor cobertura territorial en el centro-sur del país (**Figura 18**).

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

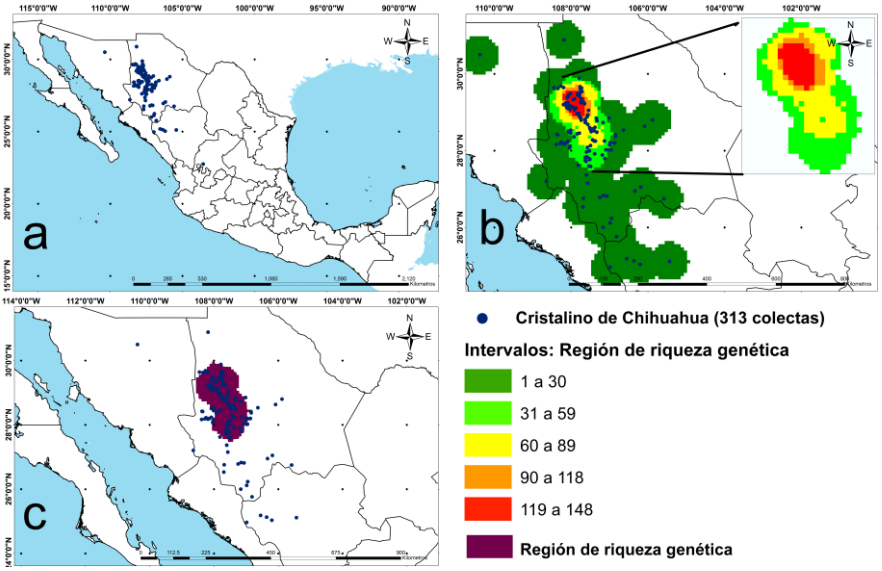


Figura 15. Delimitación de regiones de riqueza para razas con más de 30 colectas. Ejemplo Raza Cristalino de Chihuahua: a) Distribución geográfica de colectas. b) Región de riqueza genética obtenida mediante DivaGis. c) Región de riqueza genética que considera los cuatro intervalos de clase con mayor concentración de colectas (31 a 59, 60 a 89, 90 a 118 y 119 a 148).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

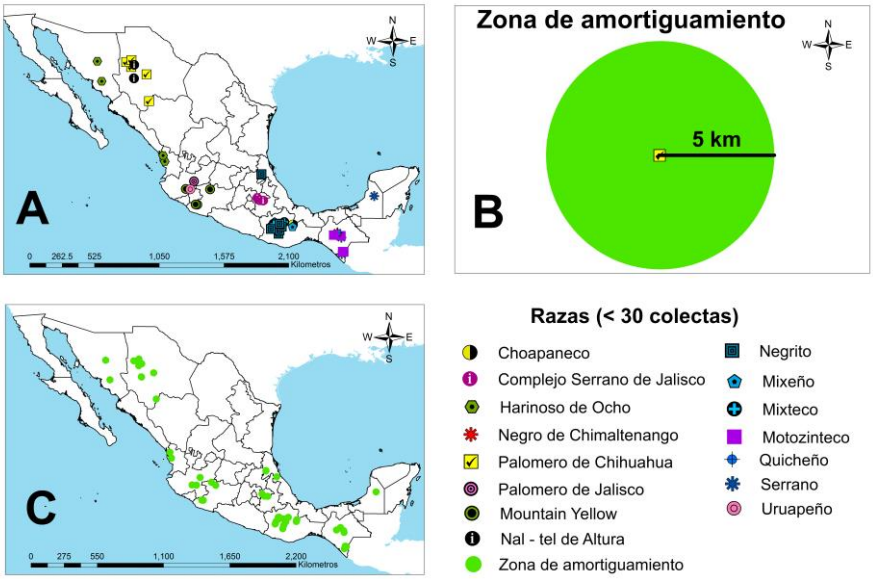


Figura 16. Delimitación espacial de las zonas de amortiguamiento para cada colecta de las razas con menos de 30 registros: a) Distribución geográfica de las colectas de las razas con menos de 30 registros. b) Representación espacial de una zona de amortiguamiento de 5 km de radio. c) Representación espacial de las zonas de amortiguamiento de 5 km de radio para cada colecta de las razas con menos de 30 registros.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

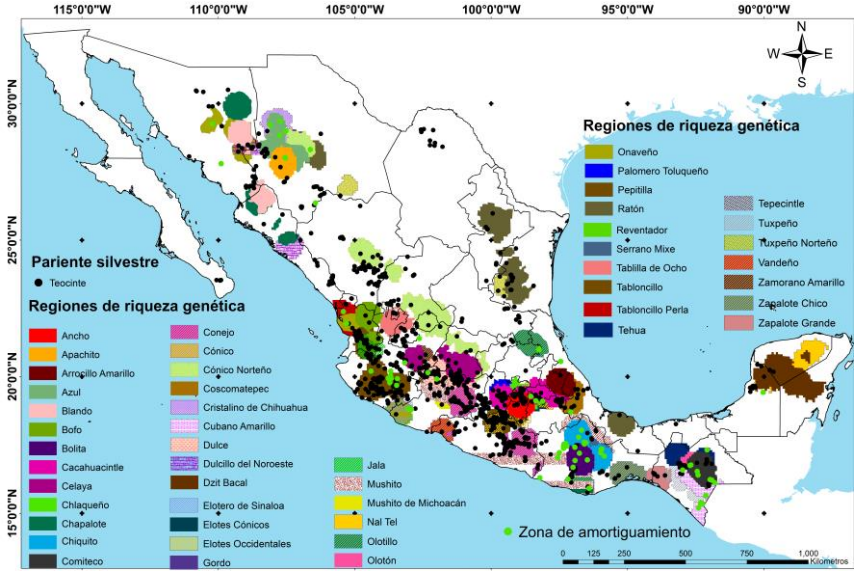


Figura 17. Representación espacial de las colectas de teocinte con las regiones de riqueza genética de las 49 razas con más de 30 colectas y zonas de amortiguamiento de 5 km de radio para las colectas de las 15 razas con menos de 30 registros.

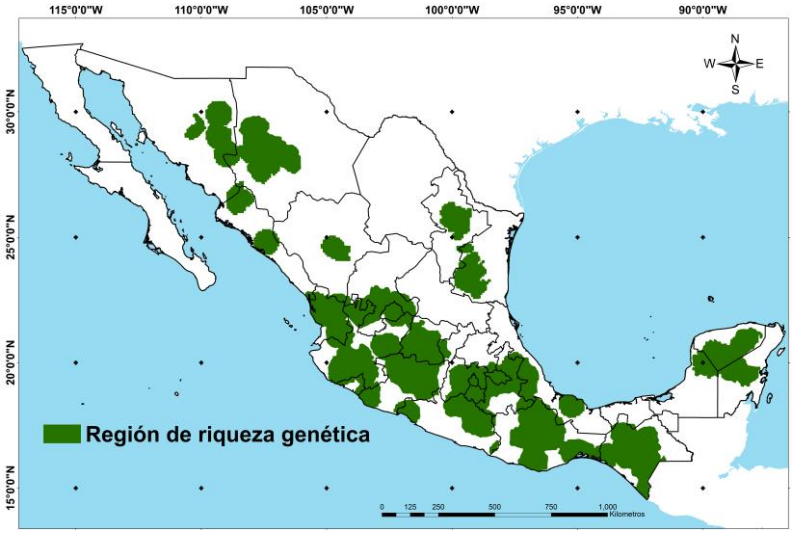


Figura 18. Región de riqueza genética para las 64 razas de maíz cultivadas en México.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

5.4.2 Delimitación espacial de la diversidad intraespecífica de maíz

Al calcular los índices de riqueza específica (Margalef y Menhinick) y los de estructura (Shannon, Brillouin y Simpson) según la distribución geográfica de las 64 razas de maíz cultivadas en México, se encontró que los índices de estructura delimitaron regiones más amplias de diversidad intraespecífica en las categorías definidas de media a muy alta. Además, a diferencia de los índices de riqueza específica, los de estructura sí delimitaron regiones de diversidad intraespecífica de media a alta en la Península de Yucatán (**Figura 19**).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

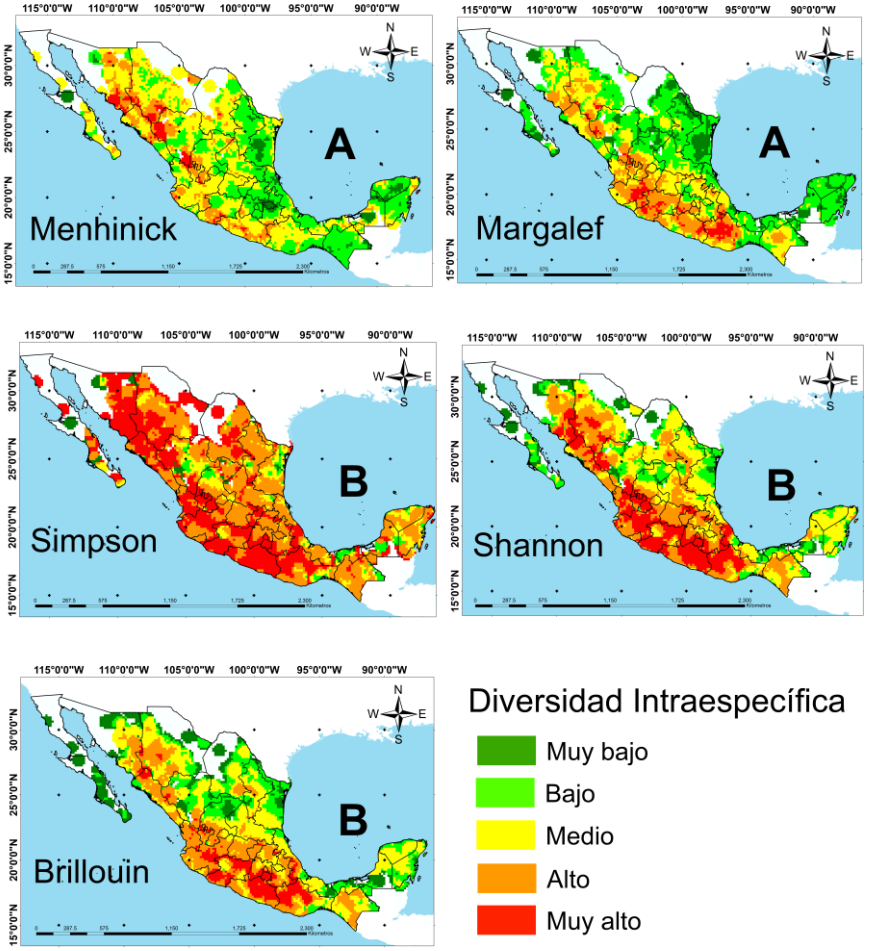


Figura 19. Delimitación espacial de los índices de riqueza específica (A: Margalef y Menhinick) y los de estructura (B: Shannon, Brillouin y Simpson) para la distribución geográfica de las 64 razas de maíz cultivadas en México.

En la propuesta metodológica de la presente investigación se decidió considerar solo a las áreas comunes con diversidad intraespecífica de media a muy alta, tanto de los índices de riqueza específica como los de estructura, ya que de acuerdo con Diker *et al*. (2004) y Graham y Hijmans (2006) al considerar solo un índice de diversidad se corre el

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

riesgo de una sub o sobre estimación de la diversidad. En la **Figura 20** se observa que las áreas comunes con diversidad intraespecífica de media a muy alta de los índices calculados se concentró del centro al norte de México.

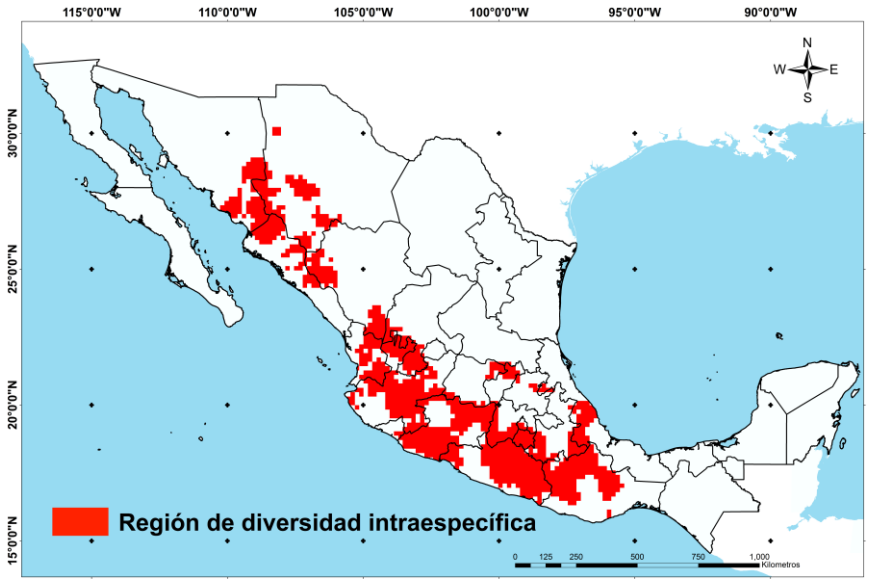


Figura 20. Distribución espacial de las áreas comunes con diversidad intraespecífica de media a muy alta para las 64 razas de maíz cultivadas en México, de los índices de riqueza específica (Margalef y Menhinick) y los de estructura (Shannon, Brillouin y Simpson).

5.4.3 Delimitación espacial del centro de diversidad de maíz

La delimitación espacial del centro de diversidad del maíz en México, se definió a partir de la unión de la región de riqueza genética de maíz, con la región de diversidad intraespecífica de maíz, y los centros de origen y domesticación del maíz establecidos para México (Kato *et al.*, 2009; **Figura 21**). En la **Figura 22** se observa que la unión de las tres regiones permitió complementar áreas, lo que ayudó a incluir razas que pudieron no haber sido contempladas por alguna de las tres regiones que conforman al centro de diversidad de maíz.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Por ejemplo, la región de diversidad intraespecífica no contempló áreas en el sureste ni noreste de México, que sí fueron incluidas por la región de riqueza genética de maíz. En el sureste de México se cultivan las razas Dzit Bacal y Nal-tel que no se cultivan en ninguna otra región del país, lo mismo sucede para la raza Tuxpeño Norteño que es cultivada mayormente en el noreste de México (Ruíz-Corral *et al.*, 2008).

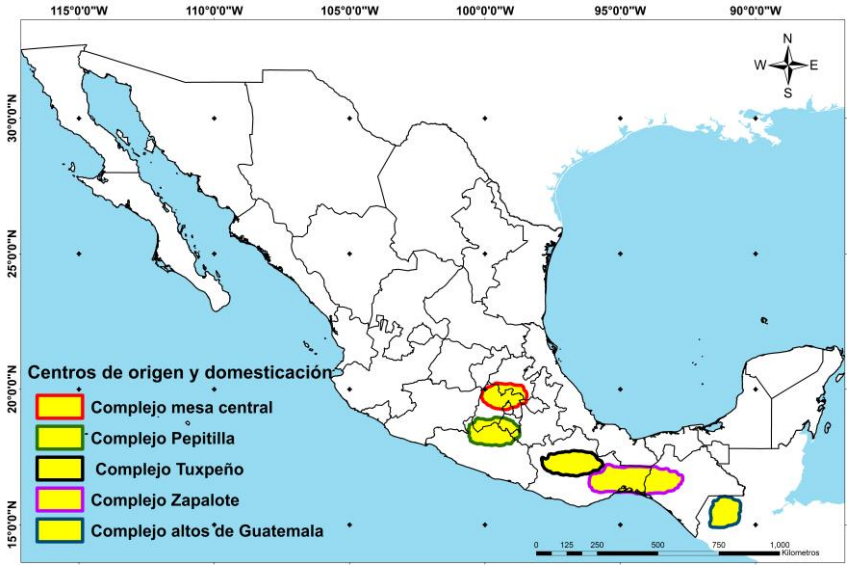


Figura 21. Delimitación espacial de los centros de origen y domesticación del maíz establecidos por Kato *et al*. (2009) en el libro Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

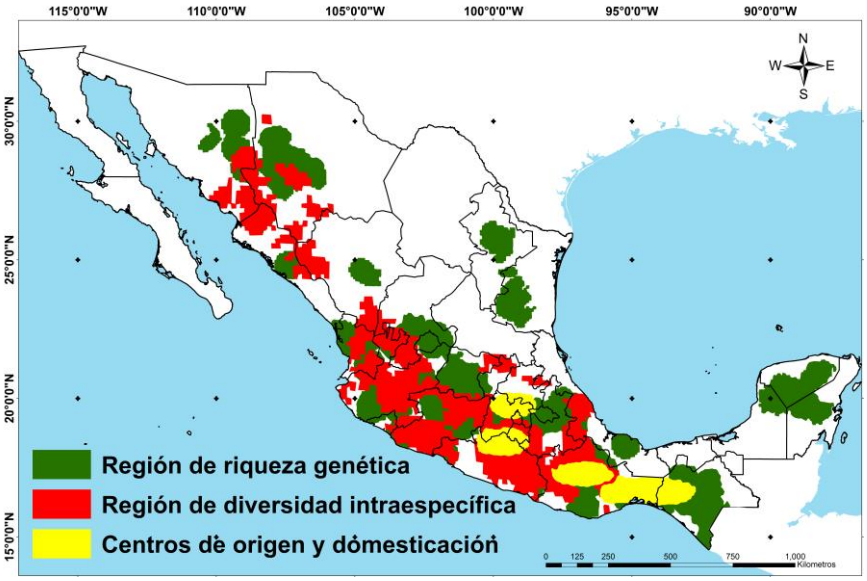
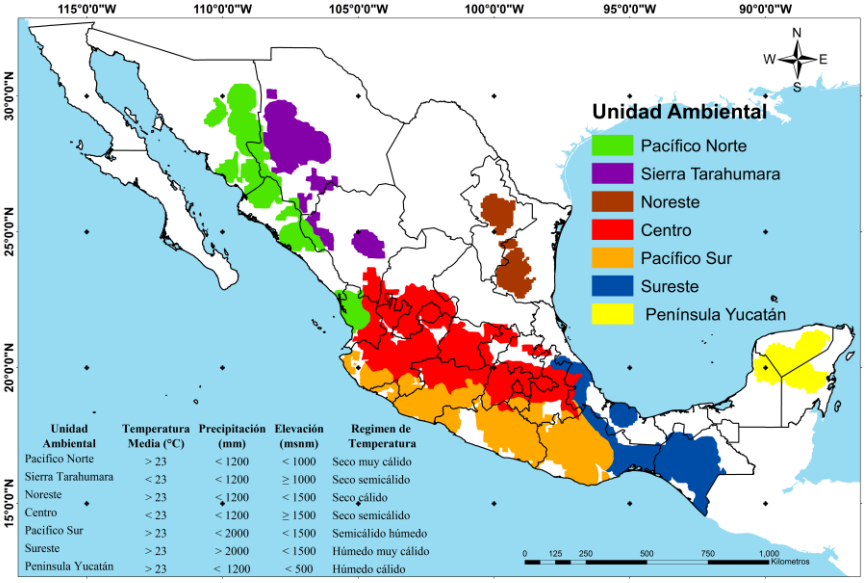


Figura 22. Delimitación espacial del centro de diversidad de maíz en México obtenido a partir de la unión de la región de riqueza genética de maíz, con la región de diversidad intraespecífica de maíz, y los centros de origen y domesticación del maíz establecidos para México.

5.4.4 Caracterización del centro de diversidad de maíz por factores climáticos

La caracterización por unidades ambientales del centro de diversidad, permitió diferenciarlo en siete unidades ambientales con diferentes umbrales climáticos: Pacífico norte, Sierra Tarahumara, Noreste, Centro, Pacífico sur, Sureste y Península de Yucatán. Como se observa en la **Figura 23** las unidades ambientales del norte del país se caracterizan por climas secos, las de centro por climas cálidos y las del sur por climas húmedos, lo que le confiere características únicas a las razas que se cultivan en cada unidad ambiental (Ruíz-Corral *et al.*, 2008).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA



Unidad Ambiental	Temperatura Media (°C)	Precipitación (mm)	Elevación (msnm)	Regimen de Temperatura
Pacifico Norte	> 23	< 1200	< 1000	Seco muy cálido
Sierra Tarahumara	< 23	< 1200	≥ 1000	Seco semicálido
Noreste	> 23	< 1200	< 1500	Seco cálido
Centro	< 23	< 1200	≥ 1500	Seco semicálido
Pacifico Sur	> 23	< 2000	< 1500	Semicálido húmedo
Sureste	> 23	> 2000	< 1500	Húmedo muy cálido
Peninsula Yucatán	> 23	< 1200	< 500	Húmedo cálido

Figura 23. Delimitación espacial de las siete unidades ambientales que se diferenciaron al caracterizar del centro de diversidad de maíz en México por factores climáticos.

5.4.5 Relación de las unidades ambientales con los grupos étnicos y usos del maíz

Al asociar el número de colectas del total que se analizaron en este estudio (18.812) con el número de razas cultivadas en México (64), el número de razas principales, grupos étnicos e índice de usos del grano y planta de maíz al interior de cada unidad ambiental, se encontró que el 84,65% (15.925) del total de colectas estuvieron incluidas en alguna de las siete unidades ambientales (**Tabla 1**). Además se logró agrupar a las 64 razas cultivadas en México de manera excluyente en las siete unidades ambientales con usos específicos de grano y planta, y grupos étnicos asociados territorialmente a la distribución geográfica de las razas de maíz; para el caso de razas con amplia distribución como Ratón y Tuxpeño, se logró diferenciarlas como razas secundarias en una o más unidades ambientales (**Tabla 14**).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 14. Relación de las principales razas de maíz cultivadas en cada unidad ambiental con usos específicos de grano y planta, y los grupos étnicos asociados territorialmente a la distribución geográfica de las razas de maíz.

Unidad Ambiental	Razas Principales		Usos*														Razas Secundarias		Etnias
			Grano											Planta					
	Nombre	% Registros	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	Nombre	% Registros	
Pacífico Norte	Harinoso de Ocho	100,00	1		1	1								1	1			Bofo	18,92	Cora
	Chapalote	74,19	1	1							1		1	1				Tabloncillo	16,11	Guarijio
	Blando	70,45	1		1					1	1	1		1				Elotero de Sinaloa	14,29	Huichol
	Dulcillo del Noroeste	70,27	1	1							1			1						Mayo
	Onaveño	56,25	1		1			1	1	1	1			1	1	1				Pima
	Tabloncillo Perla	48,98	1		1	1			1	1				1	1	1				Tarahumara
	Reventador	43,33	1	1	1	1					1			1	1	1				Tepehuán
Sierra Tarahumara	Azul	93,94	1		1	1		1	1	1	1	1		1	1	1		Cónico Norteño	25,08	Pima
	Cristalino de Chihuahua	92,01	1		1	1		1	1	1	1	1		1		1		Tablilla de Ocho	22,73	Tarahumara
	Palomero de Chihuahua	83,33			1									1				Dulcillo del Noroeste	10,81	Tepehuán
	Gordo	81,16	1		1			1	1	1	1	1		1		1		Ratón	10,28	
	Apachito	75,38			1						1			1						
Noreste	Tuxpeño Norteño	25,69	1		1				1	1				1	1	1		Tuxpeño	4,81	Ninguna
	Ratón	21,20	1		1			1	1	1	1			1	1	1				
Península Yucatán	Dzit Bacal	62,07	1		1		1	1	1	1				1		1		Tuxpeño	11,38	Chol
	Nal-tel	45,95	1		1		1	1	1	1				1		1	1			Mame
																				Maya
																				Quiché
																				Tzotzil

Tabla 14 (continuación). Relación de las principales razas de maíz cultivadas en cada unidad ambiental con usos específicos de grano y planta, y los grupos étnicos asociados territorialmente a la distribución geográfica de las razas de maíz.

| | | |

Tabla 14 (continuación). Relación de las principales razas de maíz cultivadas en cada unidad ambiental con usos específicos de grano y planta, y los grupos étnicos asociados territorialmente a la distribución geográfica de las razas de maíz.

| | | |

Tabla 14 (continuación). Relación de las principales razas de maíz cultivadas en cada unidad ambiental con usos específicos de grano y planta, y los grupos étnicos asociados territorialmente a la distribución geográfica de las razas de maíz.

| | | |

En la **Tabla 15** se observa que las unidades ambientales Centro, Pacífico Sur y Sureste, que se localizan en regiones cálidas y semicálidas con precipitaciones anuales superiores a los 1200 mm y altitud promedio de 1500 msnm, concentraron el mayor número de colectas, número de razas (número total de razas sin considerar la proporción de colectas en la unidad ambiental), y número de razas principales (número de razas con la mayor proporción de colectas en la unidad ambiental). En estas unidades ambientales también se obtuvieron los índices de uso (grano y planta) más altos y es donde territorialmente existe mayor presencia de grupos étnicos (**Figura 24**).

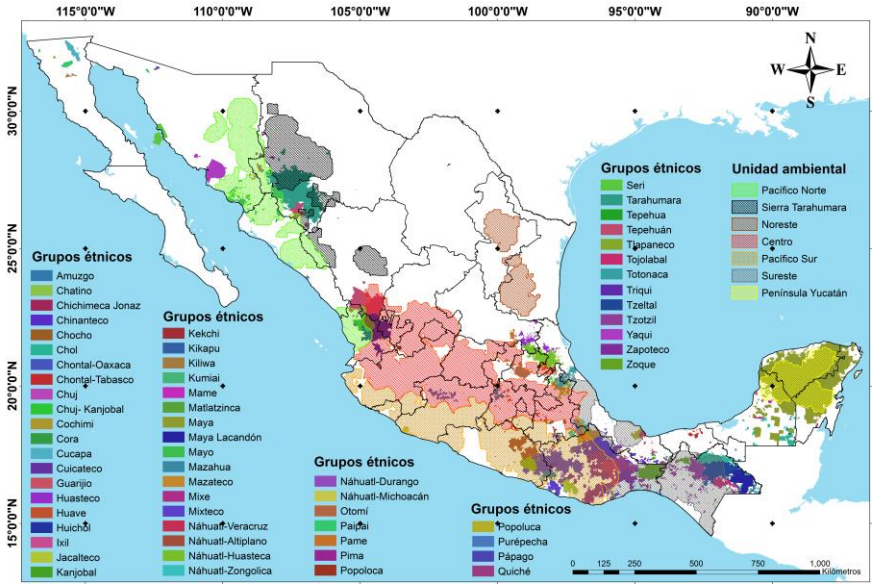


Figura 24. Distribución espacial de las unidades ambientales y los grupos étnicos que existen en México.

Finalmente, los resultados del análisis de correlación de Pearson mostraron que en las unidades ambientales donde existe un mayor número de grupos étnicos, el número de razas de maíz y sus usos (grano y planta) tiende a ser mayor (**Tabla 16**).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Tabla 15. Número de colectas, número de razas, número de razas principales, grupos étnicos e índice de usos del grano y planta de maíz en el interior de cada unidad ambiental.

Unidad Ambiental	Colectas		Razas		Razas Principales		Etnias		Índice de Usos		
	Número	% Total	Número	% Total	Número	% Total	Número	% Total	$\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{k=1}^{15} U_{jk}$	$(64)(15)$	IU_i
Pacífico Norte	516	2,74	25	39,06	7	10,94	7	11,11	45	960	0,05
Sierra Tarahumara	993	5,28	25	39,06	5	7,81	3	4,76	35	960	0,04
Noreste	379	2,01	8	12,50	2	3,13	0	0,00	16	960	0,02
Centro	6010	31,95	49	76,56	23	35,94	18	28,57	162	960	0,17
Pacífico Sur	3340	17,75	44	68,75	14	21,88	17	26,98	96	960	0,10
Sureste	4196	22,30	33	51,56	11	17,19	24	38,10	82	960	0,09
Península Yucatán	491	2,61	8	12,50	2	3,13	5	7,94	17	960	0,02
Suma	15.925	84,65			64	100,00					
Total	18.812	100,00	64	100,00	64	100,00	63	100,00			

Tabla 16. Coeficiente de correlación de Pearson que asocia la presencia de grupos étnicos en las unidades ambientales con el número de colectas, número de razas, número de razas principales, y el índice de usos del maíz (grano y planta).

	Colectas	**Razas**	**Razas Principales**	**Grupos Étnicos**	**Índice de Usos**
Colectas	1,00000	0,87020 (0,01090)**	0,94069 (0,00160)**	0,87329 (0,01020)**	0,96079 (0,00060)**
Razas		1,00000	0,94006 (0,00160)**	0,78624 (0,03600)**	0,92844 (0,00250)**
Razas Principales			1,00000	0,76491 (0,04510)**	0,99736 (<,00010)**
Grupos Étnicos				1,00000	0,78684 (0,03580)**
Índice de Usos					1,00000

**P<0,05

5.5 DISCUSIÓN

5.5.1 Delimitación espacial de las regiones de riqueza genética por raza de maíz

El empleo de una base de datos con la distribución geográfica de 18812 colectas de las 64 razas de maíz cultivadas en México permitió identificar a nivel nacional las regiones de riqueza genética y la diversidad intraespecífica de maíz. Sin embargo, se deben considerar diferencias en la clasificación racial; por ejemplo, Aragón-Cuevas *et al.* (2006) reportan una base de datos para Oaxaca donde incluyen razas como Negro de Tierra Fría, Negro Mixteco, Olotón Imbricado y Serrano de Oaxaca; razas que no fueron identificadas en la base de datos utilizada en este trabajo (CONABIO, 2011).

Además de las diferencias en la clasificación racial, en la base de datos empleada, 15 de las 64 razas analizadas tuvieron menos de 30 colectas, y el cálculo de índices de diversidad intraespecífica con herramientas GIS incrementa su confiabilidad a medida que el número de registros georreferenciados es mayor a 30 (Graham y Hijmans, 2006). En virtud de ello se calcularon dos índices de riqueza específica (que no consideraron la abundancia proporcional de las colectas) y tres de estructura (que si consideraron la abundancia proporcional de las colectas), y se delimitaron espacialmente las áreas en común de los cinco índices con diversidad de media a muy alta, lo que de acuerdo con Diker *et al*. (2004) incrementa la confiabilidad en la estimación de la diversidad intraespecífica.

A diferencia de estudios como el de Caballero-García *et al.* (2019), que definieron un centro de diversidad para el maíz en México, a partir de la unión de regiones de riqueza genética de 54 razas de maíz; y el de Perales y Golicher (2014), que identificó 11 regiones biogeográficas para el maíz en México al considerar 47 razas de maíz; nuestro estudio analizó 64 razas de maíz y definió al centro de diversidad como la suma de las regiones georreferenciadas de riqueza genética, diversidad intraespecífica y centros de origen y domesticación del maíz descritos por Kato *et al.* (2009), lo que permitió delimitar un centro de diversidad

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

espacialmente más extenso donde se consideró la diversidad de un número mayor de razas de maíz.

Con la metodología propuesta se caracterizó el centro de diversidad en unidades ambientales con diferentes condiciones climáticas, y se asoció en cada unidad ambiental las razas principales que en ella se cultivan con los usos del maíz (grano y planta) y los grupos étnicos. Por ello, a diferencia de estudios como los de Ruíz-Corral *et al.* (2008) y Ureta *et al*. (2013), que analizaron las relaciones espaciales de factores ambientales (altitud, clima, pendiente y suelo) con la distribución espacial de las razas de maíz, nuestro estudio relaciona además estos aspectos con la presencia de grupos étnicos ligados territorialmente al cultivo del maíz, por lo que este hecho puede ayudar a redirigir las políticas de conservación *in situ* de manera focal y localizada.

5.5.2 Unidades ambientales

Por los patrones de temperatura, precipitación y altitud se lograron diferenciar siete unidades ambientales con diferente régimen de humedad. Ureta *et al.* (2013) encontró que la altitud, relacionada con la humedad, es el factor que más condiciona la distribución espacial de las razas de maíz en México.

Perales y Golicher (2014), basándose en la composición racial del maíz, definieron 11 regiones biogeográficas en México, que contienen el 73% de la diversidad de razas descritas en CONABIO (2011). A diferencia del trabajo de Perales y Golicher (2014), nuestro estudio contempló el 100% de las razas descritas por CONABIO (2011), y la caracterización por unidades ambientales permitió definir condiciones climáticas en cada una de las 7 unidades ambientales, lo que de acuerdo con Ruíz-Corral *et al.* (2008) condicionan la fenología, el cultivo y el manejo agronómico del maíz.

Orozco-Ramírez *et al.* (2016a), al emplear la técnica de *hierarchical clustering* a la composición racial del maíz, encontró que la mayor riqueza y diversidad de razas de maíz en México se concentra del centro al sur del país; este hallazgo coincide con nuestros resultados. Sin embargo la resolución espacial que empleó Orozco-Ramírez *et al.*

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

(2016a) fue de 50 km, y en nuestro caso fue de 9 km, lo que de acuerdo con Scheldeman *et al.* (2007) permite una mayor precisión en la delimitación de territorios.

La concentración de un mayor número de razas de maíz del centro al sur del país ha sido un aspecto ampliamente documentado por Kato *et al.* (2009), Perales y Golicher (2014) y Orozco-Ramírez *et al.* (2016a). Sin embargo, a diferencia de estos estudios, en el nuestro se logró establecer que una mayor presencia de grupos étnicos se asocia con una mayor diversidad de razas y usos del maíz.

Al respecto, Ureta *et al.* (2013) encontraron que la presencia de grupos étnicos condicionan la distribución espacial de las razas de maíz, al encargarse de preservar, adaptar y cultivar las razas locales para fines específicos. Perales *et al.* (2005), Brush y Perales (2007), y Orozco-Ramírez *et al*. (2016b) también describen una fuerte correlación entre los grupos étnicos y la diversidad de razas de maíz. Sin embargo, a diferencia de los anteriores estudios, el nuestro describe la variedad de usos que se le dan al grano y a la planta del maíz.

En México se aprovecha toda la planta del maíz, desde el grano en la preparación de alimentos y botanas, hasta las hojas, tallo y raíces como forraje, combustible y abono orgánico (Fernández-Suárez *et al.*, 2013). Sin embargo, para el mexicano hay un proceso base para su alimentación, la *nixtamalización* que da origen a la masa de maíz que sirve para la preparación de tortillas, atoles y tamales envueltos en *totomoxtle*, que es la hoja que cubre a la mazorca (Masas y Flour, 2002).

En nuestro estudio se lograron establecer usos específicos del maíz por raza y grupo étnico. Y aunque los valores más altos del índice de usos se obtuvieron en las unidades ambientales del centro al sur del país, se diferenciaron unidades ambientales como Sierra Tarahumara y Península de Yucatán donde existen razas específicas ligadas ancestralmente al desarrollo de los grupos étnicos que ahí se encuentran.

Por ejemplo, la raza Apachito, ligada al desarrollo del grupo étnico Tarahumara en las sierras de Chihuahua (Orozco-Ramírez *et al.*, 2016a), es empleada para la fabricación de *tejuino*, bebida alcohólica

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

característica del norte de México que sustituye al *pulque* a base de maguey (*Agave salmiana*) del centro-sur del país (Godoy *et al.*, 2003). Las razas Dzit Bacal y Nal-tel, base de la alimentación de los Mayas en la Península de Yucatán (Fernández-Suárez *et al.*, 2013), son utilizadas para la preparación del *pozol*, que es una bebida refrescante que mezcla cacaco (*Theobroma cacao*) con maíz (Olivares-Illana *et al.*, 2002).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

6. CONCLUSIONES GENERALES

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

6. CONCLUSIONES GENERALES

CAPÍTULO I. La evolución espacio-temporal de la producción científica mostró un crecimiento lineal de trabajos científicos a nivel mundial sobre maíz OGM, que se concentraron principalmente en países de América, con especial énfasis en America Latina: México, Colombia, Argentina, Brasil y Cuba. Los temas de mayor relevancia fueron los relacionados con productividad (26,28%), plagas y enfermedades (12,65%), y competitividad (12,10%). Sin embargo, la relevancia (medida por el número de citas) de la producción científica en América Latina fue casi nula, como resultado de la publicación en revistas editadas en los propios países, en español, cuando las revistas de impacto están lideradas por países anglosajones, en inglés. Para el caso de México se encontró una centralización de la investigación que se desfasa espacialmente de las áreas de producción; un fenómeno denominado *endogamia académica* que consiste en publicar en revistas que edita la propia institución de los autores; y no se observó un autor con producción constante durante el periodo de análisis, sino más bien los investigadores respondieron a *"modas científicas"* acordes con las políticas agrarias del momento. Por lo que la investigación sobre maíz OGM en Latinoamérica tiene un amplio margen de mejora a través de la publicación de textos en inglés y en revistas de mayor impacto, lo que puede contribuir a la competitividad agrícola del sector en cada país.

CAPÍTULO II. La política agrícola en México en el periodo 2013-2018 impulsó la producción de maíz grano por medio de la Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional, a diferencia del periodo 2007-2012 cuando se promovió el uso de variedades transgénicas. A pesar de estos esfuerzos por tecnificar el cultivo con

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

una visión de altos rendimientos mediante el uso intensivo de insumos y semillas mejoradas, en el centro y sur del país, no se lograron los cambios tecnológicos esperados; ha sido más fuerte la tradición ancestral en el cultivo, asociada a la mayor variedad de maíces nativos y a una mayor población indígena. Las regiones de producción en secano mostraron los mayores descensos en productividad y los niveles más bajos de adopción de variedades transgénicas; la razón principal que expusieron los productores es que el incremento en los rendimientos de campo no es económicamente rentable respecto al incremento en los costos de producción, por lo que los productores prefieren el cultivo de razas nativas. De esta forma la política agrícola para incrementar la productividad se debería orientar en la protección de los agricultores de subsistencia, revalorizando el uso de las razas de maíz nativas.

CAPÍTULO III. El empleo de herramientas GIS para la delimitación territorial de regiones de riqueza genética y diversidad intraespecífica del maíz, y su asociación con los grupos étnicos y los usos del maíz, permitió diferenciar 7 unidades ambientales, en cada una de las cuales se identificaron las razas de maíz con mayor presencia. Las 64 razas de maíz cultivadas en México fueron agrupadas de manera excluyente en cada una de las 7 unidades ambientales: Pacifico norte (7 razas principales), Sierra Tarahumara (5), Noreste (2), Centro (23), Pacífico Sur (14), Sureste (11) y Península de Yucatán (2). La mayor diversidad de usos y razas de maíz se encontró desde el centro al sur del país, con una fuerte asociación con los grupos étnicos en cada una de las regiones. Estos resultados pueden ayudar en la toma de decisiones para la conservación *in situ* de las razas de maíz en México, al identificar territorios con características únicas vinculadas a las razas de maíz y a los grupos étnicos específicos con un saber hacer tradicional y, por tanto, garantizar la seguridad alimentaria y promover un aumento del valor añadido de los derivados del maíz basados en razas de maíz específicas preservadas por las etnias locales.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

7. ABREVIATURAS

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

7. ABREVIATURAS

USA, Estados Unidos de América; maíz OGM , maíz genéticamente modificado; ARS, Análisis de Redes Sociales; UAM, Universidad Autónoma Metropolitana; UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México; UNC, Universidad Nacional de Colombia; COLPOS, Colegio de Postgraduados; INIFAP, Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria; UACM, Universidad Autónoma de la Ciudad de México; CHAPINGO, Universidad Autónoma Chapingo; IPN, Instituto Politécnico Nacional; UAEM, Universidad Autónoma del Estado de México; UdeG, Universidad de Guadalajara; UAAAN, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; UATam, Universidad Autónoma de Tamaulipas; UNACH, Universidad Autónoma de Chiapas; SNI-CONACYT, Sistema Nacional de Investigadores - Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología; UGTO, Universidad de Guanajuato; ECOSUR, El Colegio de la Frontera Sur; OI, Otoño-Invierno; PV, Primavera-Verano.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

8. CONTRIBUCIONES POR AUTOR

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

8. CONTRIBUCIONES POR AUTOR

Alberto Santillán Fernández: Conceptualización, análisis de la información, redacción y edición del borrador original y final; *Yolanda Salinas Moreno*: Revisión de datos y seguimiento de resultados; *José René Valdez Lazalde*: Análisis de la información y revisión del manuscrito final; *Santiago Pereira Lorenzo*: Redacción, revisión y edición del manuscrito final.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

9. REFERENCIAS

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

9. REFERENCIAS

Aguado-López, E., Rogel-Salazar, R., Garduño-Oropeza, G., Becerril-García, A., Zúñiga-Roca, M., & Velázquez-Álvarez, A. (2009). Patrones de colaboración científica a partir de redes de coautoría. *Convergencia: Revista de Ciencias Sociales*, 16, 225-258.

Aguilar-Gallegos, N., Martínez-González, E.G., Aguilar-Ávila, J., Santoyo-Cortés, H., Muñoz-Rodríguez, M., & García-Sánchez, E.I. (2016). Análisis de redes sociales para catalizar la innovación agrícola: de los vínculos directos a la integración y radialidad. *Estudios Gerenciales*, 32, 197-207. https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.06.006

Aleixandre, J. L., Aleixandre-Tudó, J. L., Bolaños-Pizarro, M., & Aleixandre-Benavent, R. (2015). Mapping the scientific research in organic farming: a bibliometric review. *Scientometrics*, 105, 295-309. https://doi.org/10.1007/s11192-015-1677-4

Anguix, A., & Díaz, L. (2008). gvSIG: A GIS desktop solution for an open SDI. *Journal of Geography and Regional Planning*, 1(3), 041-048.https://doi.org/10.5897/JGRP.9000067

Aragón-Cuevas F., Taba, S., Hernández-Casillas, J., Figueroa, C.J., Serrano, A.B., & Castro-García, F. (2006). Catálogo de Maíces Criollos de Oaxaca. INIFAP-SAGARPA, Mexico.

Bardsley, D., & Thomas, I. (2005). Agrobiodiversity conservation for regional development in Nepal. GeoJ. 62, 27–39. https://doi.org/10.1007/s10708-004-1941-2

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M. (2009). Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. *Icwsm*, 8, 361-362.

Bellon, M.R., Hodson, D., & Hellin, J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *P Natl A Sci*. 108, 13432-13437. https://doi.org/10.1073/pnas.1103373108

Bitzer, R.J., Rice, M.E., Pilcher, C.D., Pilcher, C.L., & Lam, W.K.F. (2005). Biodiversity and community structure of epedaphic and euedaphic springtails (Collembola) in transgenic rootworm Bt corn. *Environmental Entomology*, 34, 1346-1376. https://doi.org/10.1093/ee/34.5.1346

Börner, K. (2011). Science of Science Studies: Sci2 Tool. *Communications of the ACM*, 54, 60-69.

Bouchet-Valat, M., & Bastin, G. (2013). RcmdrPlugin. temis, a graphical integrated text mining solution in R. *The R Journal*, 5, 188-196.

Bravo-Vinaja, Á. (2015). Impacto de la Revista Fitotecnia Mexicana y de las revistas mexicanas indexadas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38, 229-234.

Bravo-Vinaja, Á., & Sanz-Casado, E. (2008). Análisis bibliométrico de la producción científica de México en Ciencias Agrícolas durante el periodo 1983-2002. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31, 187-194.

Brush, S.B. (1995). In situ conservation of landraces in centers of crop diversity. *Crop sci.*, 35, 346-354. https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500020009x

Brush, S.B., & Perales, H.R. (2007). A maize landscape: Ethnicity and agro-biodiversity in Chiapas Mexico. *Agr. Ecosyst. Environ*, 121, 211-221. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.018

Buntin, G.D., Lee, R.D., Wilson, D.M., & McPherson, R.M. (2001). Evaluation of YieldGard transgenic resistance for control of fall armyworm and corn earworm (Lepidoptera:

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Noctuidae) on corn. *Florida Entomologist*, 84, 37-42. https://doi.org/10.2307/3496660

Caballero-García, M.A., Córdova-Téllez, L., & López-Herrera, A.D.J. (2019). Validación empírica de la teoría multicéntrica del origen y diversidad del maíz en México. *Revista fitotecnia mexicana*, 42(4), 357-366.

Cañas-Guerrero, I., Mazarrón, F. R., Pou-Merina, A., Calleja-Perucho, C., & Díaz-Rubio, G. (2013). Bibliometric analysis of research activity in the "Agronomy" category from the Web of Science, 1997–2011. *European Journal of Agronomy*, 50, 19-28. https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.002

Carpentieri-Pípolo, V., Souza, A.D., Silva, D.A.D., Barreto, T.P., Garbuglio, D.D., & Ferreira, J.M. (2010). Avaliação de cultivares de milho crioulo em sistema de baixo nível tecnológico. *Acta Sci-Agron.*, *32*, 229-233. https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i2.430

Chao, C.C., Yang, J. M., & Jen, W. Y. (2007) Determining technology trends and forecasts of RFID by a historical review and bibliometric analysis from 1991 to 2005. Technovation, 27, 268-279. https://doi.org/10.1016/j.technovation.2006.09.003

Chauvet, M., & Lazos, E. (2014). El maíz transgénico en Sinaloa: ¿tecnología inapropiada, obsoleta o de vanguardia? Implicaciones socioeconómicas de la posible siembra comercial. *Sociológica/México*, 29, 7-44.

CONABIO. (2001). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/ (acceso 15.03.18).

CONABIO. (2007). Elementos para la determinación de centros de origen y centros de diversidad genética en general y el caso específico de la liberación experimental de maíz transgénico al medio ambiente en México. *Rev. Geog. Agr.*, 38, 121-140.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

CONABIO. (2011). Base de datos del proyecto global "Recopilación, generación, actualización y análisis de información acerca de la diversidad genética de maíces y sus parientes silvestres en México". http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/proyectoMaices.html (acceso 03.03.2017).

CONACYT. (2020). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia. Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica. http://conricyt15.summon.serialssolutions.com.conricyt.remotexs.co/#!/search?ho=t&fvf=IsFullText,true,f&l=es-ES&q=maiz%20transgenico (acceso 05.02.2020).

Corte-Cruz, P.S., & Carrillo-Huerta, M.M. (2018). Impactos del Programa Procampo en la producción de maíz y frijol en México, 2000-2010. *EconoQuantum,* 15, 95-112. https://doi.org/10.18381/eq.v15i2.7130

Cruz-Delgado, D., Leos-Rodríguez, J.A., & Altamirano-Cárdenas, J.R. (2013). México: Factores explicativos de la producción de frutas y hortalizas ante la apertura comercial. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.,* 19, 267-278. http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.05.029

Daly, T., & Buntin, G.D. (2005). Effect of Bacillus thuringiensis transgenic corn for lepidopteran control on nontarget arthropods. *Environmental Entomology,* 34, 1292-1301. https://doi.org/10.1093/ee/34.5.1292

Davis, P. M., & Onstad, D. W. (2000). Seed mixtures as a resistance management strategy for European corn borers (Lepidoptera: Crambidae) infesting transgenic corn expressing Cry1Ab protein. *Journal of Economic Entomology*, 93, 937-948. https://doi.org/10.1603/0022-0493-93.3.937

Diker, K., Heermann, D.F., Bausch, W.C., & Wright, D.K. (2004). Shannon-Wiener's diversity index for linking yield monitor and remotely sensed data for corn. *T ASAE,* 47, 1347-1356.

Dively, G. P. (2005). Impact of transgenic VIP3A× Cry1Ab lepidopteran-resistant field corn on the nontarget arthropod

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

community. *Environmental Entomology*, 34, 1267-1291. https://doi.org/10.1093/ee/34.5.1267

Donnet, M.L., López-Becerril, I.D., Black, J.R., & Hellin, J. (2017). Productivity differences and food security: a metafrontier analysis of rain-fed maize farmers in MasAgro in Mexico. *AIMS Agric. Food*, 2, 129-148. https://doi.org/10.3934/agrfood.2017.2.129

Dyer, G.A., Serratos-Hernández, J.A., Perales, H.R., Gepts, P., Piñeyro-Nelson, A., Chávez, A., Salinas-Arreortua, N., Yúnez-Naude, A., Taylor, J. E., & Alvarez-Buylla, E. R. (2009). Dispersal of transgenes through maize seed systems in Mexico. *PloS One*, 4, e5734. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005734

Dyer, G.A., López-Feldman, A., Yúnez-Naude, A., & Taylor, J.E. (2014). Genetic erosion in maize's center of origin. P. Natl. A. Sci. 111, 14094-14099.

Dyer, G.A., & Taylor, J.E. (2008). A crop population perspective on maize seed systems in Mexico. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105, 470–475. https://doi.org/10.1073/pnas.0706321105

Espinosa-Calderón, A., Turrent-Fernández, A., Tadeo-Robledo, M., Vicente-Tello, S., Gómez-Montiel, N., Valdivia-Bernal, R., Sierra-Macias, M., & Zamudio-González, B. (2014). Ley de Semillas y Ley Federal de Variedades Vegetales y transgénicos de maíz en México. *Rev. Mex. De Cienc. Agrícolas*, 5, 293–308.

Esquinas-Alcazar, J. (2005). Protecting crop genetic diversity for food security: political, ethical and technical challenges. *Nat. Rev. Genet.*, 6, 946–953. https://doi.org/10.1038/nrg1729

ESRI. (2015). Environmental Systems Research Institute. ArcGIS (Versión 10.3) Software de procesamiento digital de imágenes satelitales. Redlands, CA, USA. http://www.esri.com/software/arcgis/ arcgis-for-desktop (acceso 04.03.2020).

FAO. (2012). Food and Agriculture Organization. http://www.fao.org/ (acceso 11.03.2018).

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

FAOSTAT. (2020). The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. Crops. Disponible en: http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC (acceso 17.02.2020).

Faria, C. A., Wäckers, F. L., Pritchard, J., Barrett, D. A., & Turlings, T. C. (2007). High susceptibility of Bt maize to aphids enhances the performance of parasitoids of lepidopteran pests. *PLoS One*, 2, e600. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000600

Fernández-Suárez, R., Morales-Chávez, L.A., & Gálvez-Mariscal, A. (2013). Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional: Una revisión indispensable. *Rev. Fitotec. Mex.*, 36, 275-283.

Franco, R., González, C., & Ramírez, J. (2016). Semilleros de Investigación vs Comunidades Científicas ¿Moda ó Necesidad?. *Revista Teckne*, 6, 35-37.

García-Rodríguez, J.G., Mendoza-Elos, M., Cervantes-Ortiz, F., Ramirez-Pimentel, J.G., Agrirre-Mancilla, C.L., Gracía-Perea, M.A., Figueroa-Rivera, M.G., Rodríguez-Pérez, G., & Rodríguez-Herrera, S.A. (2019). Adaptabilidad de híbridos precomerciales tropicales de maíz en el Bajío de Guanajuato, México. *Rev .Investig. Agrar. Ambient.*, 10, 57-65. https://doi.org/10.22490/21456453.2481

Gersbach, H., & Schneider, M. T. (2015). On the global supply of basic research. *Journal of Monetary Economics*, 75, 123-137. https://doi.org/10.1016/j.jmoneco.2015.02.004

Gianessi, L.P. (2005). Economic and herbicide use impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science*, 61, 241-245. https://doi.org/10.1002/ps.1013

Giraldo, P., Benavente, E., Manzano-Agugliaro, F., & Gimenez, E. (2019). Worldwide research trends on wheat and barley: A bibliometric comparative analysis. *Agronomy*, 9, 352-369. https://doi.org/10.3390/agronomy9070352

Godoy, A., Herrera, T., & Ulloa, M. (2003). Más allá del pulque y el tepache. Las bebidas alcohólicas no destiladas indígenas de México. México. UNAM.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Gómez-Oliver, L. (1994). La política agrícola en el nuevo estilo de desarrollo latinoamericano. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: Santiago, Chile, p. 675.

Gómez-Orea, D. (1994). Ordenación del Territorio. Una aproximación desde el Medio Físico. Agrícola Española, Madrid.

González-Estrada, A., & Alferes-Varela, M. (2010). Competitividad y ventajas comparativas de la producción de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas*, 1, 381-396.

González-Merino, A., & Ávila-Castañeda, J.F. (2014). El maíz en Estados Unidos y en México: Hegemonía en la producción de un cultivo. *Argumentos,* 27, 215–237.

Graham, C.H., & Hijmans, R.J. (2006). A comparison of methods for mapping species ranges and species richness. *Global. Ecol. Biogeogr.*, 15, 578-587. https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2006.00257.x

Granovetter, M.S. (1973). The strength of weak ties. *American Journal of Sociology*, 78, 1360-1380. https://doi.org/10.1086/225469

Guarino, L., Jarvis, A., Hijmans, R.J., & Maxted, N. (2002). Geographic information systems (GIS) and the conservation and use of plant genetic resources. In: Engels JMM, Ramanatha, R.V.B., Jackson, M.T., (Eds). Managing Plant Genetic Diversity. Wallingford: CABI, pp. 387–404.

He, K., Wang, Z., Zhou, D., Wen, L., Song, Y., & Yao, Z. (2003). Evaluation of transgenic Bt corn for resistance to the Asian corn borer (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Economic Entomology,* 96, 935-940. https://doi.org/10.1093/jee/96.3.935

Hernández-Hernández, B., Rendón-Medel, R., Toledo, J.U., & Santoyo-Cortés, V.H. (2016). Potencial económico y agronómico de la adopción de semillas de maíz genéticamente modificado en México. *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas,* 7, 3051-3061.

Hernández-Vidal, N. (2018). Territorializando STS: an analysis of current discussions about agro-biotechnology governance

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

in Latin America, Europe, and the USA. *Tapuya: Latin American Science, Technology and Society*, 1, 70-83. https://doi.org/10.1080/25729861.2018.1493180

Hijmans, R., Cameron, E., Parra, L., Jones, G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25, 1965-1978. https://doi.org/10.1002/joc.1276

Hijmans, R.J., Guarino, L., Cruz, M., & Rojas, E. (2001). Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS. *Plant genetic resources newsletter*, 1, 15-19.

Hijmans, R.J., Garrett, K.A., Huaman, Z., Zhang, D.P., Schreuder, M., & Bonierbale, M. (2000). Assessing the geographic representativeness of genebank collections: the case of Bolivian wild potatoes. *Conserv. Biol.*, 14, 1755-1765. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2000.98543.x

Hijmans, R.J., Schreuder, M.J.C., & Guarino, L. (1999). Using GIS to check coordinates of genebank accessions. *Genet. Resour. Crop. Ev.*, 46, 291–296. https://doi.org/10.1023/A:1008628005016

Huffman, W.E., Jin, Y., Xu, Z. (2018). The economic impacts of technology and climate change: new evidence from US corn yields. *Agric Econ.*, 49, 463-479. https://doi.org/10.1111/agec.12429

Hufford, M.B., Martínez-Meyer, E., Gaut, B.S., Eguiarte, L.E., & Tenaillon, M.I. (2012). Inferences from the historical distribution of wild and domesticated maize provide ecological and evolutionary insight. PLoS One., 7, e47659. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047659

Hufford, M.B., Berny-Mier y Teran, J.C., & Gepts, P. (2019). Crop biodiversity: an unfinished magnum opus of nature. Annu. *Rev. Plant. Biol.*, 70, 727-751. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040240

INEGI. (2020). México en cifras: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=00 (acceso 15.02.2020).

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Jarvis, D. I., & Hodgkin, T. (1999). Wild relatives and crop cultivars: detecting natural introgression and farmer selection of new genetic combinations in agroecosystems. *Molecular ecology*, 8, S159-S173. https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.1999.00799.x

Juárez-Hernández, S., & Pardo, C.S. (2020). Assessing the potential of alternative farming practices for sustainable energy and water use and GHG mitigation in conventional maize systems. *Environ. Dev. Sustain.*, 22, 8029-8059. https://doi.org/10.1007/s10668-019-00559-2

Kato, T.A., Mapes, C., Mera, L.M., Serratos, J.A., & Bye, R.A. (2009). Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, DF, pp. 116.

Kato, Y.T.A. (2005). Cómo y dónde se originó el maíz. *Inv. Cienc.* 347, 68- 72.

Lazos-Chavero, E. (2014). Consideraciones socioeconómicas y culturales en la controvertida introducción del maíz transgénico: el caso de Tlaxcala. *Sociológica (México).*, 29, 201-240.

LDRS. (2001). Ley de Desarrollo Rural Sustentable. Diario Oficial de la Federación. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Ciudad de México. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/235_120419.pdf (acceso 7.04.2020).

Leipold, S. (2014). Creating forests with words−A review of forest-related discourse studies. *Forest Policy Economics*, 40, 12-20. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2013.12.005

Li, W., & Zhao, Y. (2015). Bibliometric analysis of global environmental assessment research in a 20-year period. *Environmental Impact Assessment Review*, 50, 158-166. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.012

Los Santos-Ramos, D., Romero-Rosales, T., & Bobadilla-Soto, E.E. (2017). Dinámica de la producción de maíz y frijol en

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

México de 1980 a 2014. *Agron. Mesoam.,* 28, 439-453. http://dx.doi.org/10.15517/ma.v28i2.23608

Lundgren, J.G., & Wiedenmann, R.N. (2002). Coleopteran-specific Cry3Bb toxin from transgenic corn pollen does not affect the fitness of a nontarget species, Coleomegilla maculata DeGeer (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental entomology*, 31, 1213-1218. https://doi.org/10.1603/0046-225X-31.6.1213

Lusk, J. L., Roosen, J., & Fox, J. A. (2003). Demand for beef from cattle administered growth hormones or fed genetically modified corn: A comparison of consumers in France, Germany, the United Kingdom, and the United States. *American journal of agricultural economics*, 85, 16-29. https://doi.org/10.1111/1467-8276.00100

Martínez-Santiago, S.Y., Alvarado-Segura, A.A., Zamudio-Sánchez, F.J., & Cristóbal-Acevedo, D. (2017). Análisis espacio-temporal de la modelación forestal en México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 23, 5-22. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.01.003

Masas, O., & Flour, N.C. (2002). Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado. *Agrociencia.*, 36, 320.

Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M.M., Sanchez, J., Buckler, E., & Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 99, 6080–6084. https://doi.org/10.1073/pnas.052125199

Mendoza-Vargas, M. (2017). Ángel Bassols Batalla y la renovación de la geografía mexicana. *Terra Bras.*, 9, 1-18. https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.2307

Mercer, K.L., Perales, H.R., & Wainwright, J.D. (2012). Climate change and the transgenic adaptation strategy: Smallholder livelihoods, climate justice, and maize landraces in Mexico. *Global. Environ. Chang.*, 22, 495-504. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.01.003

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Mottaleb, K.A., Loladze, A., Sonder, K., Kruseman, G., & Vicente, F.S. (2019). Threats of Tar Spot Complex disease of maize in the United States of America and its global consequences. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Chang.*, 24, 281-300. https://doi.org/10.1007/s11027-018-9812-1

Murray-Tortarolo, G.N., Jaramillo, V.J., & Larsen, J. (2018). Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico. *Agric. For. Meteorol.*, 253, 124-131. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.011

Mwangi, M., & Kariuki, S. (2015). Factors determining adoption of new agricultural technology by smallholder farmers in developing countries. *J. Econ. Sustain. Dev.*, 6, 208-2016

Nayak, S., & Bankapur, V. (2017). Scientometric Analysis of Scholarly Publications of Agronomist Dr. GS Khush. *VEETHIKA-An International Interdisciplinary Research Journal*, 3, 1-14.

Noriero-Escalante, L., & Massieu-Trigo, Y.C. (2018). Campesinos maiceros en Tlaxcala: viabilidad, caracterización y respuestas ante el maíz transgénico. *Sociedad y ambiente*, 16, 179-206.

Olivares-Illana, V., Wacher-Rodarte, C., Le-Borgne, S., & López-Munguía, A. (2002). Characterization of a cell-associated inulosucrase from a novel source: A Leuconostoc citreum strain isolated from Pozol, a fermented corn beverage of Mayan origin. *J. Ind. Microbiol. Biot.*, 28, 112-117. https://doi.org/10.1038/sj/jim/7000224

Onstad, D. W., Guse, C. A., Spencer, J. L., Levine, E., & Gray, M. E. (2001). Modeling the dynamics of adaptation to transgenic corn by western corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Economic Entomology*, 94, 529-540. https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.2.529

Orozco-Ramírez, Q., Perales, H., & Hijmans, R.J. (2016a). Geographical distribution and diversity of maize (Zea mays L. subsp. mays) races in Mexico. *Genet. Resour. Crop. Ev.* 1-11. https://doi.org/10.1007/s10722-016-0405-0

Orozco-Ramírez, Q., Ross-Ibarra, J., Santacruz-Varela, A., & Brush, S. (2016b). Maize diversity associated with social origin and

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

environmental variation in Southern Mexico. *Heredity.*, 116, 477. https://doi.org/10.1038/hdy.2016.10

Ortiz-García, S., Ezcurra, E., Schoel, B., Acevedo, F., Soberón, J., & Snow, A.A. (2005). Absence of detectable transgenes in local landraces of maize in Oaxaca, Mexico (2003–2004). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 12338-12343. https://doi.org/10.1073/pnas.0503356102

Palacios-Argüello, L., Morganti, E., & González-Feliu, J. (2017). Food hub: Una alternativa para alimentar las ciudades de manera sostenible. *Rev. Transp. Territ.*, 17, 10-33. https://doi.org/10.34096/rtt.i17.3865

Peng, S.B. (2017). Booming research on rice physiology and management in China: A bibliometric analysis based on three major agronomic journals. Journal of Integrative *Agriculture*, 16, 2726-2735. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61804-5

Perales, H., & Golicher, D. (2014). Mapping the diversity of maize races in Mexico. *PLoS One*, 9, e114657. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114657

Perales, H.R., Benz, B.F., & Brush, S.B. (2005). Maize diversity and ethnolinguistic diversity in Chiapas, Mexico. *P. Natl. Acad. Sci. Usa.*, 102, 949-954. https://doi.org/10.1073/pnas.0408701102

Pérez-Pérez, E.F., & Villafuerte-Solís, D. (2019). El dilema de los campesinos frente a los imperativos del mercado neoliberal en Los Altos de Chiapas, México. *Estud. Rurales*, 9, 1-18.

Pilcher, C.D., Rice, M.E., & Obrycki, J.J. (2005). Impact of transgenic Bacillus thuringiensis corn and crop phenology on five nontarget arthropods. *Environmental Entomology*, 34, 1302-1316. https://doi.org/10.1093/ee/34.5.1302

Pilcher, C.D., Rice, M.E., Higgins, R.A., Steffey, K.L., Hellmich, R.L., Witkowski, J., Calvin, D., Ostile, K.R., & Gray, M. (2002). Biotechnology and the European corn borer: Measuring historical farmer perceptions and adoption of transgenic Bt corn as a pest management strategy. *Journal of Economic*

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Entomology, 95, 878-892. https://doi.org/10.1093/jee/95.5.878

Piperno, D.R., Ranere, A.J., Holst, I., Iriarte, J., & Dickau, R. (2009). Starch grain and phytolith evidence for early ninth millennium B.P. maize from the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*., 106, 5019–5024. https://doi.org/10.1073/pnas.0812525106

Ruíz-Corral, J.A., Durán-Puga, N., Sánchez-González, J.J., Rón-Parra, J., González-Eguiarte, D.R., Holland, J.B., & Medina-García, G. (2008). Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 mexican maize races. Crop. Scie., 48, 1502-1512. https://doi.org/10.2135/cropsci2007.09.0518

Sales-Rocha, R., Rodríguez-Nascimento, M., Barroso-Chagas, J.T., Nunes de Almeida, R., Ricardo dos Santos, P., Queiroz da Silva Sanfim de Sant'Anna, C., Pureza da Cruz, D., Danilo da Silva-Costa, K., Amaral-Gravina, G., & Figueiredo-Daher, R. (2019). Association among Agro-morphological Traits by Correlations and Path in Selection of Maize Genotypes. *J. Exp. Agric. Int.*, 34, 1-12. https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v34i230170

Sánchez González, J.D.J., Ruiz Corral, J.A., García, G.M., Ojeda, G.R., Larios, L.D.L.C., Holland, J.B., Medrano, R. M., & García Romero, G.E. (2018). Ecogeography Of Teosinte. *Plos One*, 13:E0192676. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192676

Sánchez-Cano, J.E.S. (2014). La política agrícola en México, impactos y retos. *Rev. Mex. Agroneg.*, 35, 946-956.

Sánchez-Toledano, B.I., Kallas, Z., & Gil, J.M. (2017). Importancia de los objetivos sociales, ambientales y económicos de los agricultores en la adopción de maíz mejorado en Chiapas, México. *Rev. Fac. Cienc. Agrar.*, 49, 269-287.

Santillán-Fernández, A., Salas-Zúñiga, A., & Vásquez-Bautista, N. (2018). La productividad de la vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews) en México de 2003 a 2014. *Rev. Mex. de Cienc. Forestales*, 9, 50-69. http://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.165

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Santillán-Fernández, A., Salinas-Moreno, Y., Valdez-Lazalde, J.R., Bautista-Ortega, J., & Pereira-Lorenzo, S. (2021a). Spatial Delimitation of Genetic Diversity of Native Maize and Its Relationship with Ethnic Groups in Mexico. *Agronomy*, 11, 672. https://doi.org/10.3390/agronomy11040672

Santillán-Fernández, A., Salinas-Moreno, Y., Valdez-Lazalde, J.R., & Pereira-Lorenzo, S. (2021b). Spatial-Temporal Evolution of Scientific Production about Genetically Modified Maize. *Agriculture*, 11, 246. https://doi.org/10.3390/agriculture11030246

Santillán-Fernández, A., Santoyo-Cortes, V.H., García-Chávez, L.R., & Covarrubias-Gutiérrez, I. (2014). Dinámica de la producción cañera en México: Periodo 2000 a 2011. *Agro product.*, 7, 23-29.

Saxena, D., & Stotzky, G. (2001). Bt corn has a higher lignin content than non-Bt corn. *American journal of botany*, 88, 1704-1706. https://doi.org/10.2307/3558416

Scheldeman, X., Willemen, L., d'Eeckenbrugge, G.C., Romeijn-Peeters, E., Restrepo, M. T., Motoche, J. R., Rodríguez, D., Ocampo, J.A., Van Damme, P., & Goetgebeur, P. (2007). Distribution, diversity and environmental adaptation of highland papayas (Vasconcellea spp.) in tropical and subtropical America. Biodivers. Conserv., 16, 1867-1884. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6444-9_19

Schröder, W., & Schmidt, G. (2012). Overview of principles and implementations to deal with spatial issues in monitoring environmental effects of genetically modified organisms. *Environmenta. Sciences. Europe*., 24, 6. https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-6

Schwentesius, R.R., & Sangerman, J.D.M. (2014). Desempeño competitivo de la fruticultura mexicana, 1980-2011. *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas 2014*, 5, 1287-1300.

Serrano-Carreto, E. (2006). Regiones indígenas de México. Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. México.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/35735/cdi-regiones-indigenas-mexico.pdf (acceso 10.10.2018).

Serratos-Hernández, J.A., Islas-Gutiérrez, F., Buendía-Rodríguez, E., & Berthaud, J. (2004). Gene flow scenarios with transgenic maize in Mexico. *Environmental Biosafety Research.*, 3, 149-157. https://doi.org/10.1051/ebr:2004013

SIAP. (2018) Atlas agroalimentario 2012-2018: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018 (acceso 23.01.2020).

SIAP. (2020). Producción Agrícola: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: http://www.numerosdelcampo.sagarpa.gob.mx/publicnew/productosAgricolas (acceso 25.09.2020).

Silva, T.H.P., Moro, M.M., Silva, A.P.C., Meira, W., & Laender, A.H.F. (2014). Community-based endogamy as an influence indicator. IEEE/ACM Joint Conference on Digital Libraries, London, United Kingdom. 67-76 pp. https://doi.org/10.1109/JCDL.2014.6970152

Sosa-Baldivia, A., & Ruíz-Ibarra, G. (2017). La disponibilidad de alimentos en México: un análisis de la producción agrícola de 35 años y su proyección para 2050. *Pap. Poblac.*, 23, 207-230. http://dx.doi.org/10.22185/24487147.2017.93.027

Soto, J.L., Hartwich, F., Monge, M., & Ampuero, L. (2006). Innovación en el Cultivo de Quinua en Bolivia: Efectos de la Interacción Social y de las Capacidades de Absorción de los Pequeños Productores. International Food Policy Research Institute: Washington DC, USA, p. 95.

SRJ. (2020). Scimago Journal and Country Rank. Journal Rankings. https://www.scimagojr.com/journalrank.php?area=1100&country=US (acceso 12.05.2020).

Storer, N.P., Van Duyn, J.W., & Kennedy, G.G. (2001). Life history traits of Helicoverpa zea (Lepidoptera: Noctuidae) on non-Bt and Bt transgenic corn hybrids in eastern North

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Carolina. *Journal of Economic Entomology*, 94, 1268-1279, https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.5.1268

Sun, J., & Yuan, B.Z. (2020). A bibliometric analysis of research on rice and irrigation from the 'Agronomy'category based on the Web of Science. *Current Science*, 119, 438-446. https://doi.org/10.18520/cs/v119/i3/438-446

Tatry, M.V., Fournier, D., Jeannequin, B., & Dosba, F. (2014). EU27 and USA leadership in fruit and vegetable research: a bibliometric study from 2000 to 2009. *Scientometrics*, 98, 2207-2222. https://doi.org/10.1007/s11192-013-1160-z

Team, R.C. (2013). R: A language and environment for statistical computing

Thrupp, L.A. (2000). Linking agricultural biodiversity and food security: the valuable role of agrobiodiversity for sustainable agriculture. *Int. Aff.*, 76, 283–297. https://doi.org/10.1111/1468-2346.00133

UCCS. (2020). Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad. Maíz transgénico en México. https://www.uccs.mx/agricultura_alimentacion/maiztransgenico/ (acceso 13.04.2020).

Ureta, C., González-Salazar, C., González, E.J., Álvarez-Buylla, E.R., & Martínez-Meyer, E. (2013). Environmental and social factors account for Mexican maize richness and distribution: a data mining approach. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 179, 25-34. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.06.017

Valencia-Romero, R., Sánchez-Bárcenas, H., & Robles-Ortiz, D. (2019). Soberanía Alimentaria de granos básicos en México: un enfoque de cointegración de Johansen a partir del TLCAN. *Análisis Económico*, 34, 223-248.

Van Etten, J., López, M.R.F., Monterroso, L.G.M., & Samayoa, K.M.P. (2008). Genetic diversity of maize (*Zea mays* L. ssp. mays) in communities of the western highlands of Guatemala: geographical patterns and processes. *Genet. Resour. Crop. Ev.*, 55, 303-317. https://doi.org/10.1007/s10722-007-9235-4

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Vargas-Larreta, B., Corral-Rivas, J.J., Aguirre-Calderón, O.A., López-Martínez, J.O., Santos-Posadas, H.M., Zamudio-Sánchez, F.J., Treviño-Garza, E.J., Martínez-Salvador, M., & Aguirre-Calderón, C.G. (2017). SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23, 437-455. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.06.040

Villegas, M.N.O., Villarreal, L.Z., Salvatierra, N.M., & Lara, O.G.H. (2018). Leyes de semillas y maíz transgénico. Análisis desde la co-producción entre ciencia y regímenes económico-políticos en México. *Agric. Soc. y Desarro.*, 15, 413–442.

Wellhausen, E.J., Roberts, L.M., Hernandez, E., & Mangelsdorf, P.C. (1952). Races of maize in Mexico. Cambridge: Bussey Institution of Harvard University, pp. 223.

Viner, B.J., & Arritt, R.W. (2010). Increased pollen viability resulting from transport to the upper boundary layer. *Field Crops Research*, 119, 195-200. ttps://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.008

Willemen, L., Scheldeman, X., Cabellos, V.S., Salazar, S.R., & Guarino, L. (2007). Spatial patterns of diversity and genetic erosion of traditional cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in the Peruvian Amazon: An evaluation of socio-economic and environmental indicators. *Genet. Resour. Crop. Ev.*, 54, 1599-1612. https://doi.org/10.1007/s10722-006-9172-7

WoS. (2020). Web of Science. Journal Citation Reports. https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/journal-citation-reports/ (acceso 18.08.2020).

Zwahlen, C., Hilbeck, A., Gugerli, P., & Nentwig, W. (2003a). Degradation of the Cry1Ab protein within transgenic Bacillus thuringiensis corn tissue in the field. *Molecular Ecology*, 12, 765-775. https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01767.x

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Zwahlen, C., Hilbeck, A., Howald, R., & Nentwig, W. (2003b). Effects of transgenic Bt corn litter on the earthworm Lumbricus terrestris. *Molecular Ecology*, 12, 1077-1086. https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01799.x

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Listado de las publicaciones que se incluyen en la tesis:

La identidad cultural del cultivo de maíz en México: importancia y retos ante la apertura comercial de transgénicos

La tesis esta compuesta por tres capítulos, en cada capitulo se reproduce la versión en español de un artículo científico publicado en inglés. La relación de las publicaciones fue la siguiente:

CAPITULO 1. Evolución espacio-temporal de la producción científica sobre maíz genéticamente modificado a nivel mundial

En este capitulo se reproduce la versión en español del articulo científico: *Spatial-Temporal Evolution of Scientific Production about Genetically Modified Maize*; que fue **publicado el 12 de marzo de 2021 en la Revista *Agriculture MDPI*.**

Cita bibliográfica: **Santillán-Fernández, A**.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Pereira-Lorenzo, S. Spatial-Temporal Evolution of Scientific Production about Genetically Modified Maize. *Agriculture* **2021**, 11, 246. **https://doi.org/10.3390/agriculture11030246**

Agriculture es una revista científica internacional de acceso abierto revisada por pares publicada mensualmente en línea por MDPI. Esta indexada en Scopus , SCIE (Web of Science) , AGRICOLA , AGRIS , RePEc y muchas otras bases de datos. Se clasifica en el Journal Citation Reuters - Q1 (Agronomía) / CiteScore - Q2 (Agronomía y ciencia de cultivos); con **factor de impacto: 2,925 (2020); Factor de impacto de 5 años: 3,044 (2020).**

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Los datos bibliométricos se pueden consultar en *https://www.mdpi.com/journal/agriculture*

La **contribución de los autores** en la publicación fue la siguiente: **Conceptualización, análisis de información y redacción del borrador original (Alberto Santillán Fernández, Candidato a Doctor)**; Resultados de la revisión y el seguimiento de los datos (Yolanda Salinas Moreno, Director de Tesis); Análisis de información y redacción del manuscrito final (José René Valdez Lazalde, Director de Tesis); y Redacción, revisión y edición del manuscrito final (Santiago Pereira Lorenzo, Director de Tesis).

De acuerdo al portal web de la revista *Agriculture* MDPI disponible en *https://www.mdpi.com/openaccess* no se requiere un permiso especial para reutilizar todo o parte del artículo publicado por MDPI, incluidas las figuras y tablas. Para los artículos publicados bajo una licencia Creative Common CC BY de acceso abierto, cualquier parte del artículo puede ser reutilizada sin permiso siempre que el artículo original esté claramente citado.

CAPITULO 2. Cambios estructurales en la producción de maíz entre 1983 y 2018: paradigmas en la adopción de maíz genéticamente modificado.

En este capítulo se reproduce la versión en español del articulo científico: *Relationship between Maize Seed Productivity in Mexico between 1983 and 2018 with the Adoption of Genetically Modified Maize and the Resilience of Local Races*; que fue **publicado el 3 de agosto de 2021 en la Revista *Agriculture MDPI*.**

Cita bibliográfica: **Santillán-Fernández, A.**; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Carmona-Arellano, M.A.; Vera-López, J.E.; Pereira-Lorenzo, S. Relationship between Maize Seed Productivity in Mexico between 1983 and 2018 with the Adoption of Genetically Modified Maize and the Resilience of Local Races. *Agriculture* **2021**, 11, 737. **https://doi.org/ 10.3390/agriculture11080737**

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Agriculture es una revista científica internacional de acceso abierto revisada por pares publicada mensualmente en línea por MDPI. Esta indexada en Scopus , SCIE (Web of Science) , AGRICOLA , AGRIS , RePEc y muchas otras bases de datos. Se clasifica en el Journal Citation Reuters - Q1 (Agronomía) / CiteScore - Q2 (Agronomía y ciencia de cultivos); con **factor de impacto: 2,925 (2020); Factor de impacto de 5 años: 3,044 (2020).** Los datos bibliométricos se pueden consultar en *https://www.mdpi.com/journal/agriculture*

La **contribución de los autores** en la publicación fue la siguiente: **Conceptualización, análisis de información y redacción del borrador original (Alberto Santillán Fernández, Candidato a Doctor)**; Resultados de la revisión y el seguimiento de los datos (Yolanda Salinas Moreno, Director de Tesis); Análisis de información y redacción del manuscrito final (José René Valdez Lazalde, Director de Tesis); Redacción, revisión y edición del manuscrito final (Mauricio Antonio Carmona Arellano); Redacción, revisión y edición del manuscrito final (Javier Enrique Vera López); y Redacción, revisión y edición del manuscrito final (Santiago Pereira Lorenzo, Director de Tesis).

De acuerdo al portal web de la revista *Agriculture* MDPI disponible en *https://www.mdpi.com/openaccess* no se requiere un permiso especial para reutilizar todo o parte del artículo publicado por MDPI, incluidas las figuras y tablas. Para los artículos publicados bajo una licencia Creative Common CC BY de acceso abierto, cualquier parte del artículo puede ser reutilizada sin permiso siempre que el artículo original esté claramente citado.

CAPITULO 3. Delimitación espacial de centros de diversidad de maíz (*Zea mays*) en México.

En este capítulo se reproduce la versión en español del articulo científico: *Spatial Delimitation of Genetic Diversity of Native Maize and Its Relationship with Ethnic Groups in Mexico*; que fue **publicado el 1 de abril de 2021 en la Revista *Agronomy MDPI*.**

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Cita bibliográfica: **Santillán-Fernández, A**.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Bautista-Ortega, J.; Pereira-Lorenzo, S. Spatial Delimitation of Genetic Diversity of Native Maize and Its Relationship with Ethnic Groups in Mexico. *Agronomy* **2021**, 11, 672. **https:// doi.org/10.3390/agronomy11040672**

Agronomy es una revista científica internacional de acceso abierto revisada por pares publicada mensualmente en línea por MDPI. Esta indexada en Scopus , SCIE (Web of Science) , AGRICOLA , AGRIS , RePEc y muchas otras bases de datos. Se clasifica en el Journal Citation Reuters - Q1 (Agronomía) / CiteScore - Q2 (Agronomía y ciencia de cultivos); con **factor de impacto: 3,417 (2020); Factor de impacto de 5 años: 3,64 (2020).** Los datos bibliométricos se pueden consultar en *https://www.mdpi.com/journal/agronomy*

La **contribución de los autores** en la publicación fue la siguiente: **Conceptualización, análisis de información y redacción del borrador original (Alberto Santillán Fernández, Candidato a Doctor)**; Resultados de la revisión y el seguimiento de los datos (Yolanda Salinas Moreno, Director de Tesis); Análisis de información y redacción del manuscrito final (José René Valdez Lazalde, Director de Tesis); redacción, revisión y edición del manuscrito final (Jaime Bautista Ortega); y Redacción, revisión y edición del manuscrito final (Santiago Pereira Lorenzo, Director de Tesis).

De acuerdo al portal web de la revista *Agronomy* MDPI disponible en *https://www.mdpi.com/openaccess* no se requiere un permiso especial para reutilizar todo o parte del artículo publicado por MDPI, incluidas las figuras y tablas. Para los artículos publicados bajo una licencia Creative Common CC BY de acceso abierto, cualquier parte del artículo puede ser reutilizada sin permiso siempre que el artículo original esté claramente citado.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

agriculture

MDPI

Review

Spatial-Temporal Evolution of Scientific Production about Genetically Modified Maize

Alberto Santillán-Fernández [1,2], Yolanda Salinas-Moreno [3,*], José René Valdez-Lazalde [4] and Santiago Pereira-Lorenzo [5]

[1] Catedrático-Conacyt, Colegio de Postgraduados Campus Campeche, Champotón 24450, Campeche, Mexico; santillan.alberto@colpos.mx
[2] International Doctorate Program of Agricultural and Environmental Sciences, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, 27002 Lugo, Spain
[3] Department of Genetic, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campus Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos 47600, Jalisco, Mexico
[4] Department of Forestry, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco 56230, Estado de México, Mexico; valdez@colpos.mx
[5] Department of Plant Production and Engineering Projects, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, 27002 Lugo, Spain; santiago.pereira.lorenzo@usc.es
* Correspondence: salinas.yolanda@inifap.gob.mx; Tel.: +52-33-2219-7627

Abstract: Maize is the grain cereal that is the basis of human and animal diets in Mexico and Latin America; it constitutes an essential crop for global food security. The objective of this study was to analyze the spatial–temporal evolution of scientific production on the theme of GMO maize, through a bibliometric analysis of the texts available in the main editorial houses (Elsevier, Scopus, and Springer), open access journal articles database (Conricyt, Scielo, Redalyc, Latindex, Claryvate Analytics, Periodica, and DOAJ), and freely accessible web search engine Google Scholar, to determine the factors that influence the impact of the studies. From 1991 to 2019, 917 texts were found whose spatial–temporal evolution showed a linear growth that concentrated in Latin America (58.56%). The low impact (measured by the number of bibliographic citations) of scientific studies developed in countries of Latin America was related to their publication in journals edited in their own countries and in Spanish, which restricts the constructive criticism of peer review. For the case of Mexico, a spatial discrepancy was also found between research centers and production areas, which limits the transference of technology; and no specialized author in theme of GMO maize was found; the researchers responded to "scientific trends" in agreement with the agrarian policies of the time.

Keywords: *Zea mays* L.; academic endogamy; scientific article; scientific trends

check for updates

Citation: Santillán-Fernández, A.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Pereira-Lorenzo, S. Spatial-Temporal Evolution of Scientific Production about Genetically Modified Maize. *Agriculture* **2021**, *11*, 246. https://doi.org/10.3390/agriculture11030246

Academic Editor: Mark O. Winfield

Received: 15 February 2021
Accepted: 8 March 2021
Published: 12 March 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is the cereal with highest worldwide production level, above wheat (*Triticum aestivum* L.) and rice (*Oryza sativa* L.), and it constitutes the basis of the human diet for countries of Latin America, especially Mexico, where it is considered a strategic crop for the country's food security [1]. With the development of biotechnology, GMO maize varieties have been created with resistance to insects and herbicides, which allows productivity to increase by area [2].

Maize is originally from Mexico, territory where 64 races are cultivated derived from the millenary domestication process of its wild relatives, Teocintle and *Tripsacum*, in combination with different environments, agricultural systems and ethnic groups [3]. However, despite this diversity of maize races, Mexico is not the main maize producer in the world. Of global production, 70.06% is concentrated in five countries, with USA (35.42%) and China (21.93%) as the leading producers, followed by Brazil (7.22%), Argentina (3.01%), and Mexico (2.48%) [1].

Unlike Mexico, USA, China, Brazil, and Argentina base their productivity on the use of GMO maize varieties, which provide higher yields in the field than the conventional varieties [4]. Reference [5] found that the agricultural competitiveness of a country is directly related with the quality of the research performed in this sector. To measure the quality of research, [6] suggest a methodology of bibliometric analysis that allows studying and analyzing the evolution of scientific activity through its publications.

The publication of a scientific study is the most effective way to transmit knowledge acquired as consequence of the research, and its visibility is important for the researchers themselves, for the institutions where they work, and for the organizations that finance the research [7]. The growth of scientific production in recent decades and their indexation in automatized bibliographic databases have strengthened the use of bibliometry and the generation of indicators to measure the results of scientific and technological activity [8].

Bibliometric studies based on the scientific articles published are supported by the application of quantitative methods, generation of indicators and mathematical models, which allow characterizing their development and evolution [9]. Through bibliometric indicators, the journals and other periodic publications can be evaluated objectively, and the trends that they follow can be observed to generate useful information to improve their management [7].

Understanding the scientific information that is developed around a topic allows making decisions in relation to its improvement [10]. Bibliometric studies have been developed in the agricultural sector to evaluate general themes of agronomy [6], specific themes such as ecological agriculture [11], fruits and vegetables [12], and even for agronomists in particular [13], agricultural journals [14], national agricultural sectors [8], and specific crops such as wheat and barley [15], and rice [9,16].

However, despite the growth in the number of publications that has taken place in the agricultural sector and specifically in themes related to transgenic maize, there is scarce research to assess the evolution and the impact of these publications at the level of the user [17]. Considering this, the objective of the present study was to analyze the spatial–temporal evolution of scientific production on the theme of GMO maize at the global level, and with emphasis for Mexico, through text mining (bibliometry) and Social Network Analysis (SNA) to determine the factors that impact the quality of the studies.

2. Materials and Methods

2.1. Origin of the Information and Data Preparation

Scientific articles about transgenic maize available in the principal editorial houses (Elsevier, Scopus, and Springer), open access journal articles database (Conricyt, Scielo, Redalyc, Latindex, Claryvate Analytics, Periodica, and DOAJ), and freely accessible web search engine Google Scholar were considered in this study. They were compiled from January to April 2020. It was considered all scientific articles available up 2019. The keywords used in the search were “maíz transgénico”, “maíz genéticamente modificado”, “genetically modified corn” and “transgenic corn”, identifying them in the titles and keywords of the publications. In addition, the “snowball” technique was used to obtain the missing articles, from the reference list of the articles initially found. However, it has to be considered that the technique of “snowball” as being non-probabilistic, has the possibility of incurring in bias, while recovering the scientific articles, favoring the documents in English. For upcoming this bias, in the search of the scientific articles, the keywords used were both in English and Spanish, what let to obtain the great majority of important publications [18].

In order to establish the bibliometric indicators, the variables analyzed from each of the articles were "name of the journal, editing institution, country of edition", and "language of publication", which served to determine the profile of the journals that publish studies related to the theme of "GMO maize; first author and collaborators" which served to understand the network of actors involved in the research; "year" used in order to place the

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

information in a time line; "institution of the first author" and "the first author's country of origin" to evaluate the frequency of publications of institutions by country.

The "postal code of the institution of the first author" served to perform a geographic localization of the information's institution of origin; in the cases when the postal address did not appear, the name of the institution was searched with Google Earth® tools and in the official pages of the institutions. The "title, abstract" and "keywords" were used to categorize the topic addressed by the publication in agreement with the classification by the National Resource Consortium of Scientific and Technological Information [19] for genetically modified maize. Finally, the usefulness of the publications was determined with the "number of citations".

Capturing the variables was done in a worksheet, in which they were systematized and classified in thematic areas according to their content; in addition, the original language of each of the texts was respected. While capturing all the information, some records were standardized because the information available in the articles was sometimes incomplete or presented with variations [20]. In addition, special characters were eliminated or changed to ease the analysis, such as: ñ (by n), accent marks, superindex, subindex, ®, ©, among others. Due to interpretation reasons, the information for the case of Mexico was separated into three periods that coincide with the periods of three government administrations: 2001–2006, 2007–2012, and 2013–2018.

2.2. Analysis with Text Mining

With the help of the RcmdrPlugin.temis complement of the statistical software R [21], the number of articles per year and journal, the institution where the research originated, and the articles where the main author is from the same institution of the journal were obtained.

2.3. Network Analysis

With the Sci2tool software [22] the interactions present between the first authors and collaborators were analyzed with the aim of understanding the consistency of the researcher's work; that is, to assess whether the author has published just in one year or else has been publishing constantly throughout time, which gives an idea of the author's consolidation on the topic of GMO maize. The syntaxis used with the Sci2tool software was Extract bipartite Network, and for its visualization the Gephi software was used [23].

Finally, with the help of the variable "postal code" and Google Earth® tools, the geographic coordinates in tenths of degree were obtained (Longitude, Latitude) of each of the articles published. The spatial representation of the number of articles per institution was carried out with the geographic package ARGIS® [24].

3. Results and Discussion

3.1. Scientific Production on GMO Maize in the International Context

From 1991 to 2019, a total of 917 scientific articles were published, which resulted in 20,997 bibliographic citations (Figure 1). The first study recorded dates from 1991; however, since 2000 a growing production was seen for the topic of "GMO maize". The period of highest productivity was from 2008 to 2018 with 76.23% of the total (699 articles). The most frequently cited studies were those published in 2003, 2004, and 2005 which together resulted in 6245 citations (29.74%).

Based on the first author's country of origin in the scientific articles, 917 studies originated in 53 countries. Of these, 74.81% (686) were concentrated in seven countries: Mexico (24.24%, 225 articles), USA (17.99%, 165), Brazil (8.40%, 77), Colombia (8.40%, 77), Argentina (5.56%, 51), Spain (5.34%, 49), and China (4.58%, 42). The fact that the countries with highest scientific production are the countries with greatest maize grain production globally stands out (Figure 2). Figure 2 also shows that the countries with highest number of publications are located in Latin America, which explains that 55.29% (507 articles) are

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

published in Spanish, 39.59% (363) in English, 3.93% (36) in Portuguese, and 1.20% (11) in other languages (primarily French, Mandarin, and Russian).

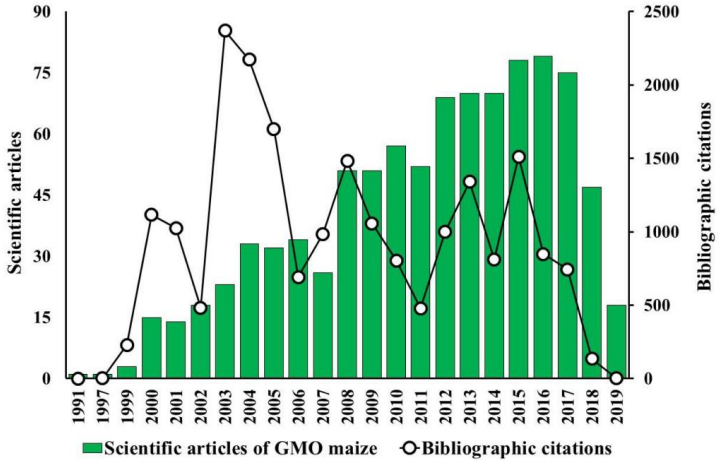


Figure 1. Temporal evolution of scientific production and bibliographic citations on the topic of GMO maize worldwide from 1991 to 2019.

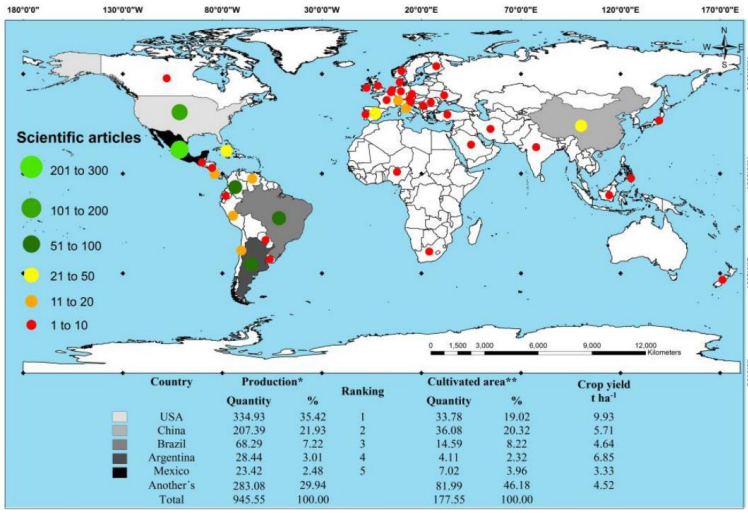


Figure 2. Spatial relation of the production of scientific articles on the topic of GMO maize with productivity indicators in the field from 1991 to 2019 (* millions t, ** millions ha) adapted from [1] with permission from FAOSTAT (2020).

According to the classification by [19], with 34 theme areas regrouped into six categories, the following results were obtained: (1) Productivity (agriculture, botany, and ecology), 36.21% of the total articles; (2) Competitiveness (economy and social sciences), 17.34%; (3) Pests and diseases (zoology and biology), 15.81%; (4) Public health (medicine and nutrition), 8.72%; (5) Cultural (anthropology, history, and archaeology), 4.25%; and (6) Others (engineering, geography, chemistry, law, and various topics), 17.67%.

In the case of the main countries that recorded scientific production about GMO maize, the themes of productivity (26.28%, 241 articles), pests and diseases (12.65%, 116), and com-

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

petitiveness (12.10%, 111) had the highest frequencies in scientific articles (Figure 3). [25] found that the policy that the USA adopted to encourage the development of technological innovations, allowed it to become the principal maize producer in the world. In contrast with Mexico, where the development of research consisted mostly in demonstrating the irrelevance of transgenic maize [17,25].

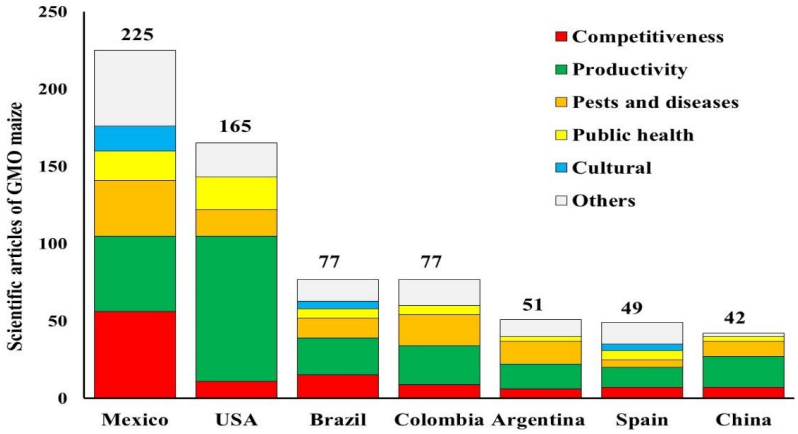


Figure 3. Principal nations and research they address, according to the first author's country of origin in scientific articles on GMO maize from 1991 to 2019.

In the 917 articles analyzed, 703 first authors were found, between author and collaborators they were 2360 different individuals in total. The mean of co-authorship was 2.57 and the mode (160) of 3 authors per article, with extreme values of a single author (29 articles) and 6 studies with more than 12 authors. The network of authors and collaborators (Figure 4) was made up of 2360 nodes (authors) and 2132 aspects (links). The links in a SNA are important because it is through them that an author can reach certain ideas, knowledge and information that is socially distant for him [26].

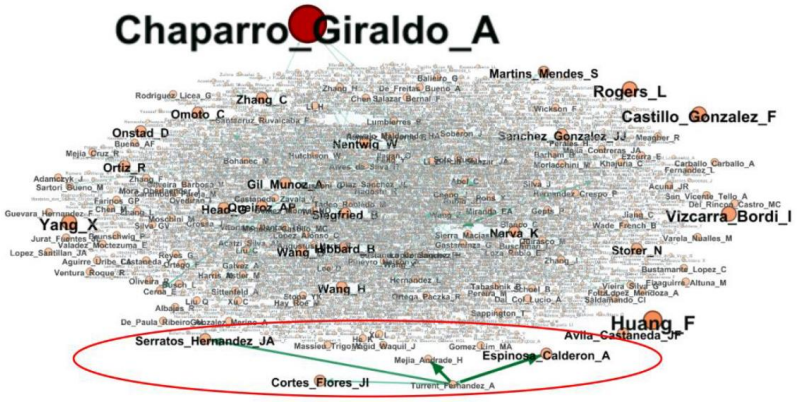


Figure 4. Network of authors and coauthors worldwide that have published scientific articles on GMO maize from 1991 to 2019. The size of the node corresponds to their productivity. The arrow connections refer to the association among authors. The arrows thickness is related with the frequency of which the authors interact. The ellipse identifies a sub-network formed by Mexican researchers.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

The density of the network had a value of 0.001, implying that for the topic of GMO maize there is not much collaboration between authors in the international context. This is evident since there are 501 institutions (from 917 studies) indicated as the ascription of the first author. The density is an indicator of the SNA that implies that both the nodes interact (are linked) between one another, mathematically it is a value within the interval (0 to 1), the closer to 1 the higher the interaction in the network [27].

The institutions with highest frequency (≥19 scientific articles) were: (1) UAM, Mexico, 36 articles, principal author Massieu_Trigo_Y; (2) UNAM, Mexico, 34, Cortes_Flores_JI; (3) UNC, Colombia, 33, Chaparro_Giraldo_A; and (4) COLPOS, Mexico, 19, Castillo_González_F. It should be noted that Chaparro_Giraldo_A from the UNC was the author with most contributions, with a total of 20 (seven as first author and 13 as coauthor).

A subnetwork formed by Mexican researchers was detected (Figure 4): Espinosa_Calderon_A, Mejia_Andrade_H and Turren_Fernandez_A from INIFAP; Cortes_Flores_JI (UNAM); Serratos_Hernandez_JA (UACM) and Massieu_Trigo_Y (UAM). As a whole, the researchers in the subnetwork are part of the Union of Scientists Committed with Society in the Agriculture and Food Program (Transgenic Maize Group) [28].

3.2. Bibliometric Indicators

The 917 studies analyzed were published in 449 scientific journals. A total of 248 articles, 27.05% and 8628 bibliographic citations, 41.09%, were found in 20 journals (Table 1). Among these 20 main journals, 13 are from Latin American countries: Mexico (5), Colombia (4), Argentina (1), Cuba (1), Venezuela (1), and Brazil (1); they publish mostly in Spanish and do not have a JCR impact factor or a very low factor (Q4), which according to [29] limits the number of bibliographic citations since English is the language adopted as universal by the scientific community.

The low impact (bibliographic citations) of the scientific studies developed in countries of Latin America is related to the fact that the researchers publish their studies in national journals (Table 2), edited in Spanish; meanwhile, the journals of highest impact are found in English-speaking countries (United Kingdom and USA) [31], published in English. This explains the high impact of articles from USA, with 63.03% of their studies published in journals of their own country, and the remaining percentage in journals of other countries also edited in English.

Among the 20 most cited studies about GMO maize themes, 14 belong to a first author whose institution of ascription is localized in USA and only one study corresponds to a researcher in Latin America (Mexico); they have all been published in English and in journals of English-speaking origin (Table 3). According to [5] the economic development of a country is directly related to the quality of the research it performs; countries with consolidated economies (USA, Switzerland, Italy, and China) invest more in their research centers, which allows them higher technological development, compared to underdeveloped economies like the Latin American where investment in research is lower. In addition, some of these consolidated economies (Switzerland, Italy, and China), whose native language is not English, also publish their studies of higher impact in this language, the same in which most of the indexed journals included in the Journal Citation Report are edited, which is included in the Web of Science (WoS) and belongs to an information company in USA, Thomson Reuters [30].

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Table 1. Bibliometric indicators of the main journals that published scientific articles on GMO maize at the global level from 1991 to 2019, ordered according to the number of articles published.

Journals					Number	
Name	**Country**	**Institution**	**JCR [30]**	**Language**	**Articles**	**Citations**
Journal of economic entomology	UK	Oxford University Press	1.970/Q2	English	34	1581
PLoS ONE	USA	Public Library of Science	3.057/Q1	English	29	1127
Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas	Mexico	INIFAP	No JCR	Spanish/English	19	92
Environmental entomology	USA	Entomological Society of America	1.802/Q2	English	15	1038
Cultivos Tropicales	Cuba	Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas	No JCR	Spanish	14	56
Mundo Agrario	Argentina	Universidad Nacional de la Plata	No JCR	Spanish	13	381
Revista Colombiana de Entomología	Colombia	Universidad del Valle	0.166/Q4	Spanish	13	106
El Cotidiano	Mexico	UAM	No JCR	Spanish	12	67
American Journal of Agricultural Economics	UK	Oxford University Press	1.436/Q2	English	10	2995
Interciencia	Venezuela	Asociación INTERCIENCIA	0.219/Q4	Spanish	10	38
Revista Colombiana de Biotecnologia	Colombia	UNC	No JCR	Spanish	10	64
Agrociencia	Mexico	COLPOS	0.370/Q3	Spanish/English	9	73
Revista Fitotecnia Mexicana	Mexico	Sociedad Mexicana de Fitogénetica A.C.	0.326/Q3	Spanish	9	204
Scientific reports	UK	Nature Publishing Group	5.228/Q1	English	9	235
Southwestern Entomologist	USA	Society of Southwestern Entomologists	0.478/Q4	English	8	39
Acta Biológica Colombiana	Colombia	UNC	0.220/Q3	English	7	29
Agronomía Colombiana	Colombia	UNC	0.180/Q4	English	7	137
Ciencia rural	Brazil	Universidade Federal de Santa Maria	0.376/Q4	English	7	95
Florida Entomologist	USA	Florida Entomological Society	0.975/Q3	English	7	233
Agricultura, Sociedad y Desarrollo	Mexico	COLPOS	No JCR	Spanish/English	6	38
Others (429)					669	12,369

Table 2. Matrix that relates the percentage and the number of scientific articles published in journals of the main countries with scientific production on GMO maize from 1991 to 2019.

Country	Country from Journal: % (Number of Scientific Articles)							Scientific Production on GMO Maize		
	Argentina	Brazil	China *	Colombia	Spain	USA **	Mexico	Sum	Other Country	Total
Argentina	64.71 (33)	5.88 (3)		15.69 (8)				86.27 (44)	13.73 (7)	100 (51)
Brazil	1.30 (1)	59.74 (46)		2.60 (2)	9.09 (7)	6.49 (5)		79.22 (61)	20.78 (16)	100 (77)
China	7.14 (3)		2.38 (1)		2.38 (1)	26.19 (11)	2.38 (1)	40.48 (17)	59.52 (25)	100 (42)
Colombia		2.60 (2)		62.34 (48)	2.60 (2)	2.60 (2)	1.30 (1)	71.43 (55)	28.57 (22)	100 (77)
Spain		4.08 (2)		4.08 (2)	55.10 (27)	4.08 (2)	6.12 (3)	73.47 (36)	26.53 (13)	100 (49)
USA					0.61 (1)	63.03 (104)	1.21 (2)	64.85 (107)	35.15 (58)	100 (165)
Mexico	2.67 (6)	0.44 (1)		3.56 (8)	2.67 (6)	4.89 (11)	78.67 (177)	92.89 (209)	7.11 (16)	100 (225)

* 9.52 (4) in journals of the Netherlands and 26.19 (11) in journals of the UK. ** 7.27 (12) in journals of the Netherlands, and 9.70 (16) in journals of the UK.

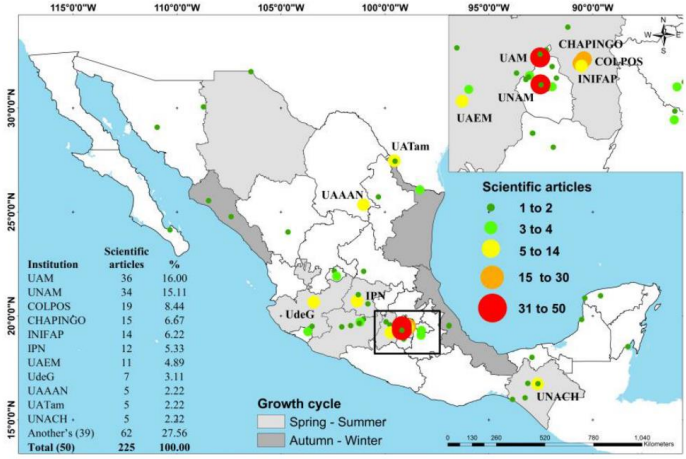
Table 3. Bibliometric indicators of the main scientific articles on GMO maize worldwide from 1991 to 2019, ordered according to the number of bibliographic citations.

First Author			Journals				
Author	Institution	Country	Name	Country	Language	Citations	Theme Area
Lusk, J.L. [32]	Purdue University	USA	*American Journal of Agricultural Economics*	UK	English	714	Public health
Saxena, D. [2]	New York University	USA	*American Journal of Botany*	USA	English	402	Productivity
Zwahlen, C. [33]	University of Bern	SW	*Molecular Ecology*	USA	English	331	Productivity
Jarvis, D.I. [34]	International Plant Genetic Resources Institute	Italy	*Molecular Ecology*	USA	English	230	Productivity
Zwahlen, C. [35]	University of Bern	SW	*Molecular Ecology*	USA	English	224	Productivity
Gianessi, L.P. [36]	CropLife Foundation	USA	*Pest Management Science*	USA	English	199	Competitiveness
Ortiz-García, S. [37]	Instituto Nacional de Ecología	Mexico	*Proceedings of the National Academy of Sciences*	USA	English	173	Productivity
Dively, G.P. [38]	University of Maryland	USA	*Environmental entomology*	USA	English	147	Pests and diseases
Lundgren, J.G. [39]	University of Illinois	USA	*Environmental entomology*	USA	English	129	Pests and diseases
Faria, C.A. [40]	University of Neuchátel	SW	*PloS One*	USA	English	116	Pests and diseases
Daly, T. [41]	University of Georgia	USA	*Environmental entomology*	USA	English	110	Pests and diseases
Davis, P.M. [42]	Monsanto Company	USA	*Journal of economic entomology*	USA	English	109	Pests and diseases
Buntin, G.D. [43]	University of Georgia	USA	*The Florida Entomologist*	USA	English	105	Pests and diseases
Pilcher, C.D. [44]	Iowa State University	USA	*Environmental entomology*	USA	English	103	Pests and diseases
Storer, N.P. [45]	North Carolina State University	USA	*Journal of economic entomology*	USA	English	103	Pests and diseases
Onstad, D.W. [46]	Illinois Natural History Survey	USA	*Journal of economic entomology*	USA	English	92	Productivity
Dyer, G A. [47]	University of California	USA	*PloS One*	USA	English	88	Productivity
He, K. [48]	Chinese Academy of Agricultural Sciences	China	*Journal of economic entomology*	USA	English	86	Pests and diseases
Pilcher, C.D. [49]	Iowa State University	USA	*Journal of economic entomology*	USA	English	82	Pests and diseases
Bitzer, R.J. [50]	Iowa State University	USA	*Environmental entomology*	USA	English	79	Pests and diseases

3.3. Scientific Production on the Theme of GMO Maize in Mexico

From 1991 to 2019 Mexican researchers published 225 scientific articles on the topic of GMO maize. From the 225 studies, 163 (72.44%) were developed in 11 of 50 institutions, taking as reference the institution of ascription of the first author. The institutions with highest productivity were UAM (36 studies), UNAM (34), COLPOS (19), CHAPINGO (15), INIFAP (14), and IPN (12). Due to tradition, in CHAPINGO (founded in 1854), COLPOS (1959) and INIFAP (1985), the studies published stemmed from the initiatives to develop agricultural research.

The spatial distribution of the institutions with scientific productivity on GMO maize (1991–2019) (Figure 5) allows deducing that research on this topic is located in the center of the country, while in terms of the states with highest maize grain production in Mexico from 2000 to 2019, the areas with highest production are in the north (Sinaloa and Chihuahua), east (Jalisco, Michoacán, Guanajuato, and Estado de México), northeast (Tamaulipas and Veracruz), and southeast (Chiapas) of Mexico. This aspect of the centralization of research has been addressed by [10], who found that the discrepancy between the production areas and the research centers makes the transference of technology difficult.



Institution	Scientific articles	%
UAM	36	16.00
UNAM	34	15.11
COLPOS	19	8.44
CHAPINGO	15	6.67
INIFAP	14	6.22
IPN	12	5.33
UAEM	11	4.89
UdeG	7	3.11
UAAAN	5	2.22
UATam	5	2.22
UNACH	5	2.22
Another's (39)	62	27.56
Total (50)	**225**	**100.00**

Figure 5. Spatial distribution of academic and research institutions in Mexico that published articles on GMO maize from 1991 to 2019, and main production areas.

The language preferred by Mexican researchers to publish their results on GMO maize was Spanish with 88.44% (199) of the studies, followed by English for the remainder 11.56% (26). The themes of most interest were those related with competitiveness (56 studies, 24.89%) and productivity (49, 21.78%) directed at showing the irrelevance of GMO maize in the Mexican farmland. The 225 studies were published in 123 different journals, 86 of which were edited by national institutions that in total published 177 articles (78.67%).

In Mexico, most of the researchers published their studies about GMO maize in journals edited by their institution of ascription (Table 4), which restricts the constructive criticism of peer review and, according to [51,52], is indicator of the low impact of the publications, since it limits the feedback from interdisciplinary groups regarding the relevance of the research. In this regard, [10,53] found that research in Mexico not only presents "academic endogamy" but also that the researchers in their eagerness to remain in the Sistema Nacional de Investigadores—Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia (SNI-CONACYT) tend to replicate the same methodologies in different study areas, which limits innovation in research and allows the circularity (redundancy in the study object) of the publications.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Table 4. Matrix that relates the percentage and the number of scientific articles published in institutional journals of the main academic and research centers with scientific production on GMO maize from 1991 to 2019 in Mexico.

Journal				First Author Institution							Total
Name	**Institution**	**JCR [30]**	**Language**	**UAM**	**UNAM**	**COLPOS**	**CHAPINGO**	**INIFAP**	**IPN**	**Others**	
Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas	INIFAP	No JCR	Spanish/English	10.53 (2)		15.79 (3)	10.53 (2)	36.84 (7)		26.32 (5)	100.00 (19)
El Cotidiano	UAM	No JCR	Spanish	50.00 (6)	8.33 (1)				8.33 (1)	33.33 (4)	100.00 (12)
Agrociencia	COLPOS	0.370/Q3	Spanish/English			44.44 (4)	22.22 (2)			33.33 (3)	100.00 (9)
Revista Fitotecnia Mexicana	Fitogenetica A.C.*	0.326/Q3	Spanish		11.11 (1)	55.56 (5)		11.11 (1)		22.22 (2)	100.00 (9)
Argumentos	UAM	No JCR	Spanish	100.00 (8)							100.00 (8)
Agricultura, Sociedad y Desarrollo	COLPOS	No JCR	Spanish/English			50.00 (3)	33.33 (2)			16.17 (1)	100.00 (6)
Soociologica	UAM	No JCR	Spanish	80.00 (4)	20.00 (1)						100.00 (5)
Acta Universitaria	UGTO	No JCR	Spanish				20.00 (1)	20.00 (1)	60.00 (3)		100.00 (5)
Sociedad y Ambiente	ECOSUR	No JCR	Spanish		40.00 (2)	20.00 (1)			40.00 (2)		100.00 (5)
AGROProductividad	COLPOS	No JCR	Spanish			60.00 (3)				40.00 (2)	100.00 (5)
Revista de Geografía Agrícola	CHAPINGO	No JCR	Spanish/English				100.00 (4)				100.00 (4)

* Civil Association coordinated by researchers from COLPOS.

Finally, the network of authors and collaborators for the case of the publications where the first author was ascribed to a Mexican institution was divided into three periods: 2001–2006, 2007–2012, and 2013–2018. The periods proposed correspond to the policies that prevailed in the country during the different governments.

By periods, the number of authors went from 59 in 2001–2006 to 130 in 2007–2012, and 291 in 2013–2018. The articles also increased from 24 to 76 and 111, respectively (Supplementary Table S1). According to [10] the increase in authors and articles that Mexico has been having in the agriforest sector is because the SNI-CONACyT awards more the quantity than the quality. In turn, [54] found that the agricultural policies adopted by Mexico during its different governments have encouraged the development of research on the theme of GMO maize.

With the promulgation of the Sustainable Rural Development Law in 2001 [55], research began in Mexico on the topic of GMO maize, while before that the studies were centered on attaining the best yields with native germplasm or improved through hybridization [54]. The government in 2007–2012 encouraged the use of GMO seed and the studies were focused on highlighting the geopolitical irrelevance of this biotechnology in Mexico as center of origin and domestication of maize [17]. Finally, the government in 2013–2018 motivated the use of improved maize varieties (native) through the Traditional Agriculture Sustainable Modernization Program (MasAgro) and the studies revolved around arguing that it is possible to achieve self-sufficiency (food security) without the need of resorting to the use of GMO varieties [54]. Of the scientific articles analyzed, 90% agree that it is not convenient the growth of GMO maize in Mexico. The main argument to this position is that Mexico is the main center of origin and domestication of maize, so there is a great genetic diversity of this species and there are close cultural connections between maize and the different native peoples.

The co-authorship networks built according to the degree of entry of the authors in the network allowed identifying the importance (reference) of the author in the network, by quantifying the number of links that an author receives from others [27]. In 2001–2006, there was not an author with high reference, and three authors were found with medium reference (Soberon_J, Schoel_B and Ezcurra_E) (Figure S1). In 2007–2012, there was an author with high reference (Castillo_González_F) (Figure S2), and in 2013–2018, two (Vizacarra_Bordi_I and Avila_Castaneda_JF) (Figure 6), the authors of medium reference increased in 5 and 18, respectively (Table S1). However, despite these increases, from 2001 to 2018 there was not an author observed whose research was constant, which points to there not being in the country any specialists in the theme, but rather research responded to scientific trends in agreement with the agrarian policies of the moment.

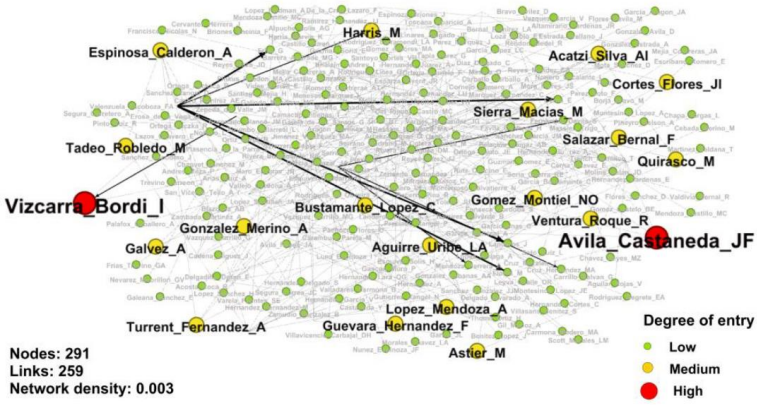


Figure 6. Network of authors and coauthors for the 2013–2018 period who published scientific articles on GMO maize where the first author is Mexican.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

4. Conclusions

The spatial–temporal evolution of scientific production showed a linear growth of scientific studies worldwide about GMO maize, which were concentrated primarily in countries of America, with special emphasis in Latin America: Mexico, Colombia, Argentina, Brazil, and Cuba. The themes of greatest relevance were those related to productivity (26.28%), pests and diseases (12.65%), and competitiveness (12.10%). However, the relevance (measured by number of citations) of scientific production in Latin America was nearly null, as a result of the publication in journals edited in the countries themselves, in Spanish, when the journals of impact are led by English-speaking countries, in English. For the case of Mexico, a centralization of research was found with spatial discrepancy from the production areas; a phenomenon called academic endogamy which consists in publishing in journals edited by the authors' own institution; and an author with constant production was not observed during the period of analysis, but rather the researchers responded to "scientific trends" in agreement to the agrarian policies of the moment. Therefore, research on GMO maize in Latin America has a broad margin of improvement through the publication of texts in English and higher impact journals, which can contribute to agricultural competitiveness of the sector in each country.

Supplementary Materials: The following are available online at https://www.mdpi.com/2077-0472/11/3/246/s1, Figure S1: Network of authors and coauthors for the 2001–2006 period who published scientific articles on GMO maize where the first author is Mexican, Figure S2: Network of authors and coauthors for the 2007–2012 period who published scientific articles on GMO maize where the first author is Mexican, Table S1: Indicators of the co-authorship networks for the periods 2001–2006, 2007–2012, and 2013–2018 of scientific articles published on GMO maize where the first author is Mexican.

Author Contributions: Conceptualization, information analysis and writing of original draft, A.S.-F.; Data review and monitoring results, Y.S.-M.; Information analysis and writing of final manuscript, J.R.V.-L.; Writing, revising, and editing of the final manuscript, S.P.-L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Availability of data. The data are available with the author for correspondence, at reasonable request.

Acknowledgments: This study is part of the doctoral thesis of the first author in the International Doctorate Program of Agricultural and Environmental Sciences of the Universidad de Santiago de Compostela, Spain; and to Project number 364. Sustainable productive reconversion for the development of rural producers in Campeche, assigned to the first author by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia (CONACyT). To the anonymous reviewers of the article, for their comments, which helped to enrich the research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Abbreviations

CHAPINGO, Universidad Autónoma Chapingo; COLPOS, Colegio de Postgraduados; ECOSUR, El Colegio de la Frontera Sur; GMO maize, Genetically Modified Maize; INIFAP, Instituto Nacional de Investigación Forestal, Agrícola y Pecuaria; IPN, Instituto Politécnico Nacional; JCR, Journal Citation Reports; SNA, Social Network Analysis; SNI-CONACYT, Sistema Nacional de Investigadores—Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia; SW, Switzerland; UAAAN, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; UACM, Universidad Autónoma de la Ciudad de México; UAEM, Universidad Autónoma del Estado de México; UAM, Universidad Autónoma Metropolitana; UATam, Universidad Autónoma de Tamaulipas; UdeG, Universidad de Guadalajara; UGTO, Universidad de Guanajuato; UK, United Kingdom; UNACH, Universidad Autónoma de Chiapas; UNC, Universidad Nacional de Colombia;

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

UNAM, Universidad Nacional Autónoma de México; USA, United States of America.

References

1. FAOSTAT. The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. Crops. Available online: http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC (accessed on 17 February 2020).
2. Saxena, D.; Stotzky, G. Bt corn has a higher lignin content than non-Bt corn. *Am. J. Bot.* **2001**, *88*, 1704–1706. [CrossRef] [PubMed]
3. Dyer, G.A.; Taylor, J.E. A crop population perspective on maize seed systems in Mexico. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2008**, *105*, 470–475. [CrossRef]
4. Mottaleb, K.A.; Loladze, A.; Sonder, K.; Kruseman, G.; Vicente, F.S. Threats of Tar Spot Complex disease of maize in the United States of America and its global consequences. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Chang.* **2019**, *24*, 281–300. [CrossRef]
5. Gersbach, H.; Schneider, M.T. On the global supply of basic research. *J. Monet. Econ.* **2015**, *75*, 123–137. [CrossRef]
6. Cañas-Guerrero, I.; Mazarrón, F.R.; Pou-Merina, A.; Calleja-Perucho, C.; Díaz-Rubio, G. Bibliometric analysis of research activity in the "Agronomy" category from the Web of Science, 1997–2011. *Eur. J. Agron.* **2013**, *50*, 19–28. [CrossRef]
7. Chao, C.-C.; Yang, J.-M.; Jen, W.-Y. Determining technology trends and forecasts of RFID by a historical review and bibliometric analysis from 1991 to 2005. *Technovation* **2007**, *27*, 268–279. [CrossRef]
8. Bravo-Vinaja, Á.; Sanz-Casado, E. Análisis bibliométrico de la producción científica de México en Ciencias Agríco-las durante el periodo 1983–2002. *Rev. Fitotec. Mex.* **2008**, *31*, 187–194.
9. Peng, S.-B. Booming research on rice physiology and management in China: A bibliometric analysis based on three major agronomic journals. *J. Integr. Agric.* **2017**, *16*, 2726–2735. [CrossRef]
10. Martínez-Santiago, S.Y.; Alvarado-Segura, A.A.; Zamudio-Sánchez, F.J.; Cristóbal-Acevedo, D. Spatio-temporal analysis of forest modeling in Mexico. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. Y Del Ambient.* **2017**, *23*, 5–22. [CrossRef]
11. Aleixandre, J.L.; Aleixandre-Tudó, J.L.; Bolaños-Pizarro, M.; Aleixandre-Benavent, R. Mapping the scientific research in organic farming: A bibliometric review. *Science* **2015**, *105*, 295–309. [CrossRef]
12. Tatry, M.-V.; Fournier, D.; Jeannequin, B.; Dosba, F. EU27 and USA leadership in fruit and vegetable research: A bibliometric study from 2000 to 2009. *Science* **2014**, *98*, 2207–2222. [CrossRef]
13. Nayak, S.; Bankapur, V. Scientometric Analysis of Scholarly Publications of Agronomist Dr. GS Khush. *Veethika-Int. Interdiscip. Res. J.* **2017**, *3*, 1–14.
14. Bravo-Vinaja, Á. Impacto de la Revista Fitotecnia Mexicana y de Las Revistas Mexicanas Indexadas. *Rev. Fitotec. Mex.* **2015**, *38*, 229. [CrossRef]
15. Giraldo, P.; Benavente, E.; Manzano-Agugliaro, F.; Gimenez, E. Worldwide Research Trends on Wheat and Barley: A Bibliometric Comparative Analysis. *Agron.* **2019**, *9*, 352. [CrossRef]
16. Sun, J.; Yuan, B.Z. A bibliometric analysis of research on rice and irrigation from the 'Agronomy'category based on the Web of Science. *Curr. Sci.* **2020**, *119*, 438–446.
17. Espinosa-Calderón, A.; Turrent-Fernández, A.; Tadeo-Robledo, M.; Vicente-Tello, S.; Gómez-Montiel, N.; Valdivia-Bernal, R.; Sierra-Macias, M.; Zamudio-González, B. Ley de Semillas y Ley Federal de Variedades Vegetales y transgénicos de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas* **2014**, *5*, 293–308. [CrossRef]
18. Leipold, S. Creating forests with words—A review of forest-related discourse studies. *Policy Econ.* **2014**, *40*, 12–20. [CrossRef]
19. CONACYT. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia. Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica. Available online: http://conricyt15.summon.serialssolutions.com.conricyt.remotexs.co/#!/search?ho=t&fvf=IsFullText,true,f&l=es-ES&q=maiz%20transgenico (accessed on 25 February 2020).
20. Aguado-López, E.; Rogel-Salazar, R.; Garduño-Oropeza, G.; Becerril-García, A.; Zúñiga-Roca, M.; Velázquez-Álvarez, A. Patrones de colaboración científica a partir de redes de coautoría. *Converg. Rev. Cienc. Soc.* **2009**, *16*, 225–258.
21. Bouchet-Valat, M.; Bastin, G. RcmdrPlugin. temis, a Graphical Integrated Text Mining Solution in R. *R J.* **2013**, *5*, 188–196. [CrossRef]
22. Börner, K. Science of Science Studies: Sci2 Tool. *Commun. Acm* **2011**, *54*, 60–69. [CrossRef]
23. Bastian, M.; Heymann, S.; Jacomy, M. Gephi: An open source software for exploring and manipulating net-works. *Icwsm* **2009**, *8*, 361–362.
24. ESRI. Environmental Systems Research Institute. ArcGIS (Versión 10.3) Software de procesamiento digital de imáge-nes satelitales. Redlands, CA, USA. Available online: http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop (accessed on 17 March 2020).
25. González-Merino, A.; Ávila-Castañeda, J.F. El maíz en Estados Unidos y en México: Hegemonía en la producción de un cultivo. *Argumentos* **2014**, *27*, 215–237.
26. Granovetter, M.S. The Strength of Weak Ties. *Am. J. Sociol.* **1973**, *78*, 1360–1380. [CrossRef]
27. Aguilar-Gallegos, N.; Martínez-González, E.G.; Aguilar-Ávila, J.; Santoyo-Cortés, H.; Muñoz-Rodríguez, M.; García-Sánchez, E.I. Análisis de redes sociales para catalizar la innovación agrícola: De los vínculos directos a la integración y radialidad. *Estud. Gerenc.* **2016**, *32*, 197–207. [CrossRef]
28. UCCS. Unión de Científicos Comprometidos con la Sociedad. Maíz transgénico en México. Available online: https://www.uccs.mx/agricultura_alimentacion/maiztransgenico/ (accessed on 8 April 2020).

29. Li, W.; Zhao, Y. Bibliometric analysis of global environmental assessment research in a 20-year period. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2015**, *50*, 158–166. [CrossRef]
30. WoS. Web of Science. Journal Citation Reports. Available online: https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/journal-citation-reports/ (accessed on 21 August 2020).
31. SRJ. Scimago Journal and Country Rank. Journal Rankings. Available online: https://www.scimagojr.com/journalrank.php?area=1100&country=US (accessed on 21 May 2020).
32. Lusk, J.L.; Roosen, J.; Fox, J.A. Demand for Beef from Cattle Administered Growth Hormones or Fed Genetically Modified Corn: A Comparison of Consumers in France, Germany, the United Kingdom, and the United States. *Am. J. Agric. Econ.* **2003**, *85*, 16–29. [CrossRef]
33. Zwahlen, C.; Hilbeck, A.; Gugerli, P.; Nentwig, W. Degradation of the Cry1Ab protein within transgenic Bacillus thuringiensis corn tissue in the field. *Mol. Ecol.* **2003**, *12*, 765–775. [CrossRef] [PubMed]
34. Jarvis, D.I.; Hodgkin, T. Wild relatives and crop cultivars: Detecting natural introgression and farmer selection of new genetic combinations in agroecosystems. *Mol. Ecol.* **1999**, *8*, S159–S173. [CrossRef] [PubMed]
35. Zwahlen, C.; Hilbeck, A.; Howald, R.; Nentwig, W. Effects of transgenic Bt corn litter on the earthworm Lumbricus terrestris. *Mol. Ecol.* **2003**, *12*, 1077–1086. [CrossRef] [PubMed]
36. Gianessi, L.P. Economic and herbicide use impacts of glyphosate-resistant crops. *Pest Manag. Sci.* **2005**, *61*, 241–245. [CrossRef]
37. Ortiz-Garcia, S.; Ezcurra, E.; Schoel, B.; Acevedo, F.; Soberon, J.; Snow, A.A. Absence of detectable transgenes in local landraces of maize in Oaxaca, Mexico (2003–2004). *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2005**, *102*, 12338–12343. [CrossRef] [PubMed]
38. Dively, G.P. Impact of Transgenic Vip3A × Cry1Ab Lepidopteran-resistant Field Corn on the Nontarget Arthropod Community. *Environ. Èntomol.* **2005**, *34*, 1267–1291. [CrossRef]
39. Lundgren, J.G.; Wiedenmann, R.N. Coleopteran-specific Cry3Bb Toxin from Transgenic Corn Pollen Does Not Affect the Fitness of a Nontarget Species,Coleomegilla maculataDeGeer (Coleoptera: Coccinellidae). *Environ. Èntomol.* **2002**, *31*, 1213–1218. [CrossRef]
40. Faria, C.A.; Wäckers, F.L.; Pritchard, J.; Barrett, D.A.; Turlings, T.C. High Susceptibility of Bt Maize to Aphids Enhances the Performance of Parasitoids of Lepidopteran Pests. *PLoS ONE* **2007**, *2*, e600. [CrossRef]
41. Daly, T.; Buntin, G.D. Effect ofBacillus thuringiensisTransgenic Corn for Lepidopteran Control on Nontarget Arthropods. *Environ. Èntomol.* **2005**, *34*, 1292–1301. [CrossRef]
42. Davis, P.M.; Onstad, D.W. Seed mixtures as a resistance management strategy for European corn borers (Lepidoptera: Crambidae) infesting transgenic corn expressing Cry1Ab protein. *J. Econ. Èntomol.* **2000**, *93*, 937–948. [CrossRef] [PubMed]
43. Buntin, G.D.; Lee, R.D.; Wilson, D.M.; McPherson, R.M. Evaluation of Yieldgard Transgenic Resistance for Control of Fall Armyworm and Corn Earworm (Lepidoptera: Noctuidae) on Corn. *Fla. Èntomol.* **2001**, *84*, 37. [CrossRef]
44. Pilcher, C.D.; Rice, M.E.; Obrycki, J.J. Impact of TransgenicBacillus thuringiensisCorn and Crop Phenology on Five Nontarget Arthropods. *Environ. Èntomol.* **2005**, *34*, 1302–1316. [CrossRef]
45. Storer, N.P.; Van Duyn, J.W.; Kennedy, G.G. Life History Traits of Helicoverpa zea (Lepidoptera: Noctuidae) on Non-Bt and Bt Transgenic Corn Hybrids in Eastern North Carolina. *J. Econ. Èntomol.* **2001**, *94*, 1268–1279. [CrossRef] [PubMed]
46. Onstad, D.W.; Guse, C.A.; Spencer, J.L.; Levine, E.; Gray, M.E. Modeling the dynamics of adaptation to transgenic corn by western corn rootworm (Coleoptera: Chrysomelidae). *J. Econ. Èntomol.* **2001**, *94*, 529–540. [CrossRef] [PubMed]
47. Dyer, G.A.; Serratos-Hernández, J.A.; Perales, H.R.; Gepts, P.; Piñeyro-Nelson, A.; Chávez, A.; Salinas-Arreortua, N.; Yúnez-Naude, A.; Taylor, J.E.; Alvarez-Buylla, E.R. Dispersal of Transgenes through Maize Seed Systems in Mexico. *PLoS ONE* **2009**, *4*, e5734. [CrossRef] [PubMed]
48. He, K.; Wang, Z.; Zhou, D.; Wen, L.; Song, Y.; Yao, Z. Evaluation of Transgenic Bt Corn for Resistance to the Asian Corn Borer (Lepidoptera: Pyralidae). *J. Econ. Èntomol.* **2003**, *96*, 935–940. [CrossRef] [PubMed]
49. Pilcher, C.D.; Rice, M.E.; Higgins, R.A.; Steffey, K.L.; Hellmich, R.L.; Witkowski, J.; Calvin, D.; Ostlie, K.R.; Gray, M. Biotechnology and the European Corn Borer: Measuring Historical Farmer Perceptions and Adoption of Transgenic Bt Corn as a Pest Management Strategy. *J. Econ. Èntomol.* **2002**, *95*, 878–892. [CrossRef] [PubMed]
50. Bitzer, R.J.; Rice, M.E.; Pilcher, C.D.; Pilcher, C.L.; Lam, W.-K.F. Biodiversity and Community Structure of Epedaphic and Euedaphic Springtails (Collembola) in Transgenic RootwormBtCorn. *Environ. Èntomol.* **2005**, *34*, 1346–1376. [CrossRef]
51. Silva, T.H.P.; Moro, M.M.; Silva, A.P.C.; Meira, W.; Laender, A.H.F. Community-based endogamy as an influence indicator. In Proceedings of the IEEE/ACM Joint Conference on Digital Libraries, London, UK, 8–12 September 2014; pp. 67–76. [CrossRef]
52. Franco, R.; González, C.; Ramírez, J. Semilleros de Investigación vs. Comunidades Científicas ¿Moda ó Necesidad? *Rev. Teckne* **2016**, *6*, 35–37.
53. Vargas-Larreta, B.; Corral-Rivas, J.J.; Aguirre-Calderón, O.A.; López-Martínez, J.O.; Santos-Posadas, H.M.D.L.; Zamudio-Sánchez, F.J.; Treviño-Garza, E.J.; Martínez-Salvador, M.; Aguirre-Calderón, C.G. SiBiFor: Sistema Biome?trico Forestal para el manejo de los bosques de Me?xico. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. Ambient.* **2017**, *23*, 437–455. [CrossRef]
54. Villegas, M.N.O.; Villarreal, L.Z.; Salvatierra, N.M.; Lara, O.G.H. Leyes de semillas y maíz transgénico. Análisis desde la co-producción entre ciencia y regímenes económico-políticos en México. *Agric. Soc. Desarro.* **2018**, *15*, 413–442. [CrossRef]
55. LDRS. Ley de Desarrollo Rural Sustentable. Diario Oficial de la Federación. Camara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Ciudad de México. Available online: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/235_120419.pdf (accessed on 7 April 2020).

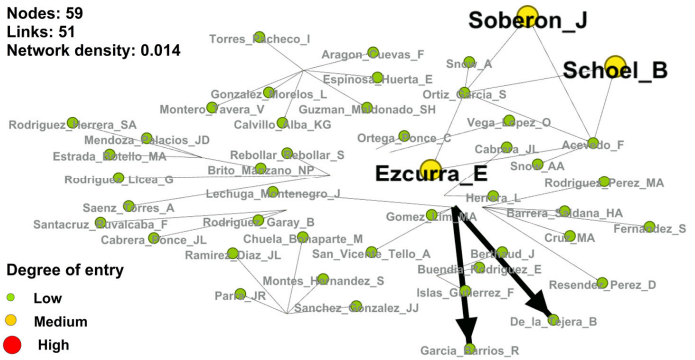


Figure S1: Network of authors and coauthors for the 2001-2006 period who published scientific articles on GMO maize where the first author is Mexican.

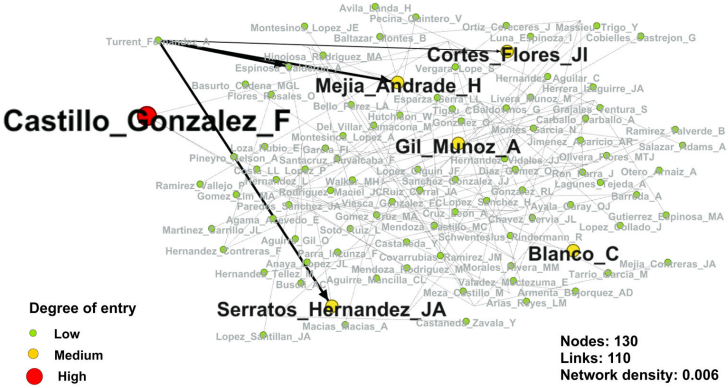


Figure S2: Network of authors and coauthors for the 2007-2012 period who published scientific articles on GMO maize where the first author is Mexican.

Table S1: Indicators of the coauthorship networks for the periods 2001-2006, 2007-2012 and 2013-2018 of scientific articles published on GMO maize where the first author is Mexican.

Indicators	Periods					Total
	1991-2000	2001-2006	2007-2012	2013-2018	2019	
Scientific articles	3	24	76	111	11	225
First author	5	21	67	103	11	207
Co-authors	5	38	63	188	26	320

agriculture

MDPI

Article

Relationship between Maize Seed Productivity in Mexico between 1983 and 2018 with the Adoption of Genetically Modified Maize and the Resilience of Local Races

Alberto Santillán-Fernández [1,2], Yolanda Salinas-Moreno [3,*], José René Valdez-Lazalde [4], Mauricio Antonio Carmona-Arellano [5], Javier Enrique Vera-López [5] and Santiago Pereira-Lorenzo [6]

1 Catedrático-Conacyt, Colegio de Postgraduados Campus Campeche, Champotón, Campeche 24450, Mexico; santillan.alberto@colpos.mx
2 International Doctorate Program of Agricultural and Environmental Sciences of the Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, 27002 Lugo, Spain
3 Department of Genetic, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campus Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos, Jalisco 47600, Mexico
4 Department of Forestry, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México 56230, Mexico; valdez@colpos.mx
5 Department of Agricultural Sciences, Colegio de Postgraduados Campus Campeche, Champotón, Campeche 24450, Mexico; mcarmona@colpos.mx (M.A.C.-A.); jvera@colpos.mx (J.E.V.-L.)
6 Department of Plant Production and Engineering Projects, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela. Galicia, 27002 Lugo, Spain; santiago.pereira.lorenzo@usc.es
* Correspondence: salinas.yolanda@inifap.gob.mx; Tel.: +52-33-2219-7627

Abstract: Mexico depends on maize imports to satisfy its national demand. The use of native maize varieties among subsistence farmers can help to reduce the cereal's imports. However, the agricultural policy in Mexico to improve the productivity per hectare has centered on the use of improved varieties; among them, the transgenic variety. In this study, the maize productivity in Mexico from 1983 to 2018 was analyzed to determine the influence of agricultural policies in the sector, and the factors that condition the adoption of transgenic maize. It was found that the agricultural policy improved the productivity of those regions with irrigation; however, for rainfed regions, the expected technological changes were not achieved because the ancestral tradition in cultivation, associated with the greater variety of native maize and to a larger indigenous population, was stronger. The adoption of transgenic maize also had low significance in the rainfed regions, since the increase in field yields is not economically profitable with regards to the increase in production costs. Therefore, the agricultural policy to increase productivity ought to be directed at the protection of subsistence farmers, revaluing the use of native varieties that have shown higher resilience to technological and environmental changes.

Keywords: *Zea mays* L.; transgenic maize; rainfed agriculture; irrigation agriculture; Procampo; MasAgro

check for updates

Citation: Santillán-Fernández, A.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Carmona-Arellano, M.A.; Vera-López, J.E.; Pereira-Lorenzo, S. Relationship between Maize Seed Productivity in Mexico between 1983 and 2018 with the Adoption of Genetically Modified Maize and the Resilience of Local Races. *Agriculture* **2021**, *11*, 737. https://doi.org/10.3390/agriculture11080737

Academic Editor: Ramegowda H Venkategowda

Received: 4 July 2021
Accepted: 31 July 2021
Published: 3 August 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Maize (*Zea mays* L.) is the cereal of highest production worldwide, above wheat (*Triticum aestivum* L.) and rice (*Oryza sativa* L.); it constitutes the basis of the human diet for countries of Latin America [1], where Mexico is considered its center of origin [2]. However, Mexico is not the main producer of maize in the world; 57.35% of the world production is concentrated in two countries, the United States of America (USA, 35.42%) and China (21.93%) [1].

Unlike Mexico, USA bases its productivity on the use of transgenic maize varieties, which provide higher yields in the field than conventional varieties, which allows the USA to have yields higher than 10 t ha^{-1} while Mexico obtains on average 3.33 t ha^{-1} [3]. In Mexico, maize production is carried out using improved varieties and native varieties, since 64 native maize races are cultivated derived from the millenary domestication process

of its wild relative *teosinte* combined with different environments, agricultural systems and ethnic groups, which confers it great agro-diversity [4].

In Mexico, approximately 7 million hectares of grain maize are grown, with a production of 23 million tons. However, national consumption is around 39 million tons, so the deficit is resolved with imports of grain from the United States of America [1]. This scenario seems difficult to revert in the short term because the per capita consumption went from 123 kg in 2000 to 196 kg in 2018 [5], with a population that annually increases in one million people with a total of 125 million in 2018 [6].

To guarantee food security of grain maize in Mexico, the national agricultural policy has established strategies and programs whose goals have been to increase the field yields and to increase the profitability for producers [7,8]. Thus, in 1994, in the Program for Direct Support to the Farmland (*Programa de Apoyos Directos al Campo*, PROCAMPO) [9], in the six-year period of 2007–2012, the use of genetically modified maize varieties was fostered [10]; and since 2012 the Sustainable Modernization of Traditional Agriculture Program (Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional, MasAgro) was created [11].

The objective of the PROCAMPO program was not only to increase grain maize production through the increase of the surface planted (ha), but also to standardize the property rights on the land [9]; meanwhile, the MasAgro program attempts to make social agriculture for subsistence more productive, to satisfy the demands of the grain and family supply [11]. In contrast with these two programs that have been applied, the strategy of producing genetically modified maize varieties to increase the yields in the field has not been implemented [12].

Santillán-Fernández et al. [13] consider that the analysis of agricultural productivity helps to understand and improve the competitiveness of a crop, when studying the interaction of the surface planted with the yields in the field, where the soil preparation and sowing techniques are manifested with the practices of agronomic management and the adoption of new production technologies. To analyze agricultural productivity, the decomposition of the production growth factors model proposed by [14] has proven to be an efficient methodology that accurately determines the influence of field yields, surface planted and the interaction of both, on production growth in a final period compared to an initial period.

The decomposition of growth factors model of agricultural production has been applied with good results in the analysis of sectors such as fruits and vegetables [15], fruticulture [16], and specific crops such as sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) [13] and vanilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews) [17]. An important factor for the productivity of an agricultural sector to improve is the adoption of new technologies of production, where the age, level of studies, size of the plot, and family income that the activity represents for producers are factors that condition the adoption [18].

In this context, the objective of this study was to analyze the productivity of grain maize in Mexico from 1983 to 2018 through the decomposition of production growth factors model, to determine the influence that agricultural policies have had on the growth of the sector, and the factors that condition the adoption of genetically modified maize. The starting hypothesis is that the low productivity of grain corn in Mexico is associated with the water production regime, which in turn is a factor that influences the decision of the producer at the time of selecting the variety to be cultivated, and therefore influences the adoption of transgenic varieties.

2. Materials and Methods

2.1. Global Maize Production and Consumption

Data were obtained from the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) about the following: production (t), surface planted (ha), field yield (t ha^{-1}), consumption (t), imports (t) and exports (t) of the main grain maize producer and consumer countries in the world for the period 2007–2018 [1].

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

2.2. Maize Production and Consumption in Mexico

Data about grain maize production (t), consumption (t), and number of inhabitants (population) from 1983 to 2018 in Mexico were obtained from FAOSTAT [1]. The 1983–2018 series was divided into six-year periods, according to the six-year periods of governments in Mexico: 1983–1988, 1989–1994, 1995–2000, 2001–2006, 2007–2012 and 2013–2018. In each period, the Mean Annual Growth Rate (MAGR) in % was calculated for each variable.

The following variables were obtained from the Agricultural and Fishing Information System [19]: production (t), surface planted (ha), field yield (t ha^{-1}), and consumption (t) of grain maize at the state level from 1983 to 2019. The first three variables were obtained for the two production cycles that are found in Mexico: Spring–Summer (SS) and Fall–Winter (FW) in the two modalities, irrigation and rainfed. For the case of consumption (t), there was only information available starting from the period 2013–2018. The classification of Mexico's economic zones proposed by [20] was taken as a reference to obtain the average balances of 2013–2018 on production minus consumption per region.

2.3. Grain Maize Productivity in Mexico

To analyze the grain maize productivity at the national and state level, the decomposition of production growth factors model proposed by [14] was used. The model determines in percentage the influence that field yields (FY), surface planted (SP), and the FY×SP interaction have on the production growth in a final period compared to an initial period.

The periods analyzed were 1983–1988 versus 1989–1994, 1989–1994 versus 1995–2000, 1995–2000 versus 2001–2006, 2001–2006 versus 2007–2012, and 2007–2012 versus 2013–2018. In addition, the methodology proposed by [13] was used to classify the states where production increased and those where it decreased in 2013–2018 compared to 2007–2012 (Table 1).

Table 1. Typology used to determine the production growth of an agricultural sector in function of the percentage variations of the surface planted and field yields.

Typology	Production Growth (%) *	Factors That Explain the Growth	
		Surface Planted (%)	Field Yield (%)
A	Increases	Increases	Increases
B	Increases	Increases	Decreases
C	Increases	Decreases	Increases
D	Decreases	Increases	Decreases
E	Decreases	Decreases	Increases
F	Decreases	Decreases	Decreases

* Production growth (%) = Surface planted (%) ± Field yield (%). The growth increases or decreases as a function of the factor that conditions it most; for example, for categories C and E, the surface planted decreases and the field yield increases. However, the production for category C grows since the field yields compensated the reduction in surface planted, which does not happen in category E, where the reduction of surface planted was higher than the efficiency in increase of field yields.

The national productivity was also analyzed through an analysis of variance, the significant differences for the variables production (t), surface planted (ha), and field yield (t ha^{-1}) for the periods 1983–1988, 1989–1994, 1995–2000, 2001–2006, 2007–2012 and 2013–2018 were determined with Tukey's means test with a reliability of 95 % ($\alpha = 0.05$).

2.4. Indicators of GMO Maize Adoption

Data were obtained from the Agricultural and Fishing Information System [19] for grain maize production (t) of the municipalities that showed continuous operations from 1983 to 2018 in SS and FW. To determine the areas of highest productivity, the annual production per municipality for the period of analysis was added, and through tools of Geographic Information Systems, it was represented spatially. The results were grouped into five class intervals: very low, low, medium, high and very high production, both for SS and FW.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Finally, to determine whether producers from the main grain maize-producing regions in Mexico are willing to adopt GMO maize, a survey was applied between August and November, 2017. The criteria used to select producers were their availability and references in the region, and they were called on by state agencies from the Ministry of Agriculture, Livestock Production, Rural Development, Fishing and Food. The survey included questions about age (years), schooling (years of study), experience in the activity (years), surface planted (ha), field yield (t ha^{-1}) in SS and FW, and family income represented by the activity (%), as well as the question: Would you adopt GMO maize?

3. Results and Discussion

3.1. Grain Maize Production and Consumption at the Global Level

Out of the global production of grain maize from 2007–2018, 73.76% was concentrated in 5 countries, with USA (35.42%) and China (21.93%) as the main producers, followed by Brazil (9.34%), Argentina (4.59%) and Mexico (2.48%) (Table 2). The production from USA and China in the analysis period was based on the broad surface planted that was destined to the maize crop, and to the good field yields, which for the case of China (5.71 t ha^{-1}) were only exceeded by Argentina (6.85 t ha^{-1}).

The intensive model of maize production that has been developed in USA is the result of the interaction of mechanized systems with the adoption of transgenic varieties, which allows for obtaining the best field yields of the world (9.93 t ha^{-1}) [7]. In Latin America, Brazil (third world producer) and Argentina (fourth) also base their production in the use of transgenic maize varieties [21]. For the case of Mexico, the low field yields that it presented (3.33 t ha^{-1}) are the result of the combination of native varieties with traditional rainfed production systems, which according to [22,23] are explained by the ethnography and culture of the country, since it is the center of origin of maize.

The maize that is imported in Mexico comes from the USA [7], so authors such as [24,25] maintain that the aversion of the Mexican population toward transgenic maize is unjustified, since the deficit between production and consumption is actually covered with transgenic maize. In this regard, [4] found that the cultivation of native races in Mexico contributes to imports of the grain being lower and ensures food security of the regions with greatest social backwardness, where, in addition, the native races show higher resilience to the rainfed environmental conditions, which has allowed them to remain in the preference of subsistence producers [26,27].

3.2. Maize Production and Consumption in Mexico

The deficit between production and consumption, which Mexico has historically showed, had its origin in the 1970s when the agrifood policy of the country encouraged the import of the grain in face of high production costs [28]. Since 1994, the difference between production and consumption shows a growing trend (Figure 1), and this fact coincides with the signature of the North American Free Trade Agreement (NAFTA) that Mexico established with USA and Canada.

According to [29], the signature of NAFTA caused Mexico to increase the imports of grain maize, by reducing the import customs fees. However, NAFTA only evidenced the productivity problems of the Mexican farmland with negative MAGR, which have been worsened by the sustained increase of the population that demands more grain maize with a per capita mean of 196 kg (Figure 1) [5].

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Table 2. Field and commercial indicators of the main producer and consumer countries of grain maize at the global level from 2007 to 2018.

Country	Field Indicators						Commercial Indicators							
	Production *		Ranking	Surface Planted **		Yieldt ha^{-1}	Consumption *		Ranking	Import *		Place	Export *		Ranking
	Quantity	%		Quantity	%		Quantity	%		Quantity	%		Quantity	%	
USA	334.93	35.42	1	33.78	19.02	9.93	310.64	26.93	1	1.53	0.96	27	51.31	32.60	1
China	207.39	21.93	2	36.08	20.32	5.71	271.73	23.56	2	7.73	4.84	5	0.24	0.15	32
Brazil	88.29	9.34	3	14.59	8.22	4.64	61.13	5.30	3	1.37	0.86	28	25.41	16.14	2
Argentina	43.44	4.59	4	4.11	2.32	6.85	14.05	1.22	7	0.01	0.01	135	20.28	12.89	3
Mexico	23.42	2.48	5	7.02	3.96	3.33	39.14	3.39	4	13.15	8.23	2	1.32	0.84	16
Others	248.08	26.24		81.99	46.18	4.52	456.73	39.60		136.00	85.11		58.86	37.39	
Total	945.55	100.00		177.55	100.00		1153.42	100.00		159.78	100.00		157.41	100.00	

* Millions of tons, ** Millions of hectares. The quantity of consumption for the period analyzed was higher than that of production, which was due to the initial stock in each of the years, considering the amount of grain in storage.

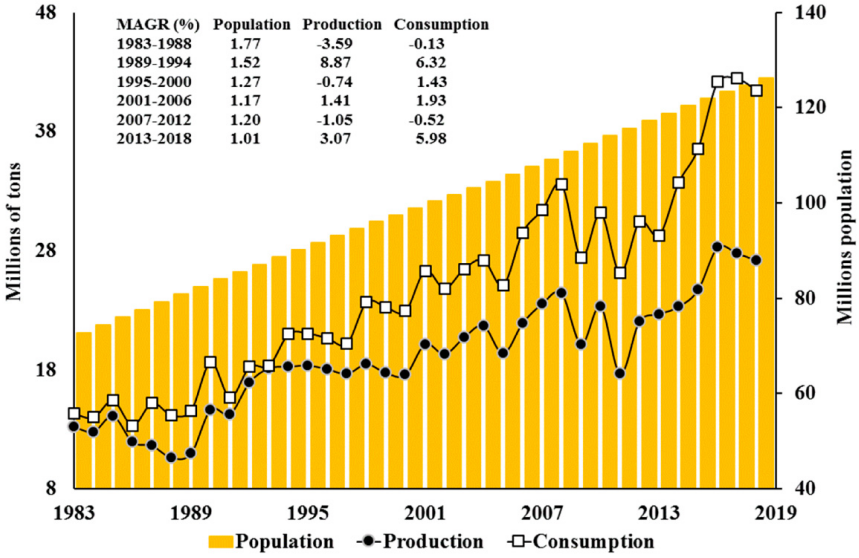


Figure 1. Temporal evolution of the Mexican population and its relationship with the production and consumption of maize from 1983 to 2018 (MAGR, Mean Annual Growth Rate).

The agrifood policy in Mexico in the six-year period of 1983–1988 caused the MAGR of this period to be negative (−3.59%), since imports were prioritized over the programs to strengthen the farmland [30]. The largest increase in production happened in the six-year period of 1989–1994 (MAGR, 8.87%) with the Program for Direct Support to the Farmland (*Programa de Apoyos Directos al Campo*, PROCAMPO) [9], which not only entailed strategies to improve competitiveness but also regularized the property rights over land. The social and economic crisis that Mexico experienced in the period of 1995–2000 had an impact on the national agricultural productivity, and maize (MAGR, −0.74%) was not the exception [30].

The enactment of the Rural Sustainable Development Law (*Ley de Desarrollo Rural Sustentable*, LDRS) in 2001 [31] meant there was an upturn for the agricultural sector in the six-year period of 2001–2006 (MAGR, 1.41%). However, in the period of 2007–2012 with the national policy of allowing GMO maize cultivation, the productivity decreased (MAGR, −1.05%) due to the uncertainty generated among small-scale producers [24]. In the last six-year period (2013–2018) with the MasAgro program, national production increased through the use of native maize varieties (MAGR, 3.07%) with small-scale producers [32]. Despite all these efforts, grain maize production in Mexico is insufficient to guarantee food security of a population in continuous growth [33].

Grain maize production in Mexico is performed in two periods: Spring–Summer (planted in May and harvested in October) and Fall–Winter (planted in December and harvested in May), both in two modalities, irrigation and rainfed. The technological gap between the regions of irrigation and rainfed production is evident in the field yields (Table 3); while for irrigation they are higher than 7 t ha^{-1}, for rainfed they are lower than 2 t ha^{-1}. Donnet et al. [32] attributed these differences not only to the irrigation systems, but rather to the use of improved varieties, because maize production in irrigation is for industrial use, while rainfed is normally for subsistence with native seeds selected from previous harvests.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Table 3. Average of field indicators for grain maize production in Mexico per production cycle and water regime from 2013 to 2018.

Cycle	Surface Planted		Field Yield	Production	
	ha	%	t ha^{-1}	t	%
Fall-Winter Irrigation	706,498.41	9.38%	8.90	6,151,702.98	24.00%
Fall-Winter Rainfed	459,989.72	6.11%	1.93	877,570.41	3.42%
Spring-Summer Irrigation	793,171.78	10.53%	7.43	5,832,350.80	22.75%
Spring-Summer Rainfed	5,570,905.11	73.98%	2.42	12,774,029.20	49.83%
Total	7,530,565.02	100.00%		25,635,653.39	100.00%

Out of the surface planted with grain maize in Mexico, 73.98% depends on summer rains and contributes 49.83% of the total production, and it develops in a context of subsistence, with low technological level and inadequate agronomic management [32] resulting in field yields of 2.42 t ha^{-1} (Table 3). This is different from irrigation zones where 46.75% of national production was obtained in 19.91% of the surface planted, with average yields higher than 7 t ha^{-1}. In Mexico, for every 1 ha of irrigation cultivation, 4 ha are planted in rainfed conditions, and for every ton of grain maize in rainfed conditions, 3.76 t were obtained with irrigation.

The problem of low rainfed grain maize productivity has been documented by [7,28,32]. These authors agree that the problem is spatial, seasonal and cultural, since more than 80% of the producers, particularly in the southeast of the country, cultivate grain maize of native varieties in plots of less than 2 ha, in the ancestral *milpa* system (association of native maize with bean -*Phaseolus vulgaris*- and squash -*Cucurbita spp.*-), with rudimentary low-cost farming tasks (cultivation management).

The growing trend in the production of grain maize for the SS-Rainfed cycle can be reverted in the short term, as consequence of the reduction of the surface planted since the year 2000 and a null growth of field yields in the same cycle (Figure 2). In this regard, [33] considers that the constant production of grain maize that Mexico has maintained in the last decade is due to the increase in productive efficiency, particularly in the irrigation areas, which compensates the low productivity per surface planted in the rainfed areas.

To determine the regions in Mexico with the highest deficits between production and consumption, the classification proposed by [20] was used, which divides the country into eight economic zones based on the existence of natural resources that allow certain productive activities and on the degree of development of the production forces. The Center East (6.81 million tons, which represents 51.65% of the national deficit), Center West (2.99 million tons, 22.68%) and Southeast (1.41 million tons, 10.72%) were the zones with the highest deficit of grain maize; in total, the three regions added up to 85.05% of national deficit (Figure 3).

According to [6], the highest grain maize deficit shown by the Center East region (51.65% of the national deficit) is due to two factors: it is the region with the highest number of inhabitants in urban zones (33.81% of the national total), and mostly represents industrial, non-agricultural activity. In contrast, the South region was the only zone in the country without deficit; this zone was characterized by containing the highest diversity of native maize races, with the highest levels of indigenous (rural) population, in addition to being a region with subsistence agriculture and rudimentary production systems that depend on summer rains [22,23]. The demographic and economic differences between both regions expose the capacity of rural zones to produce their own food, so the challenge is: How to feed the cities? [34,35].

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

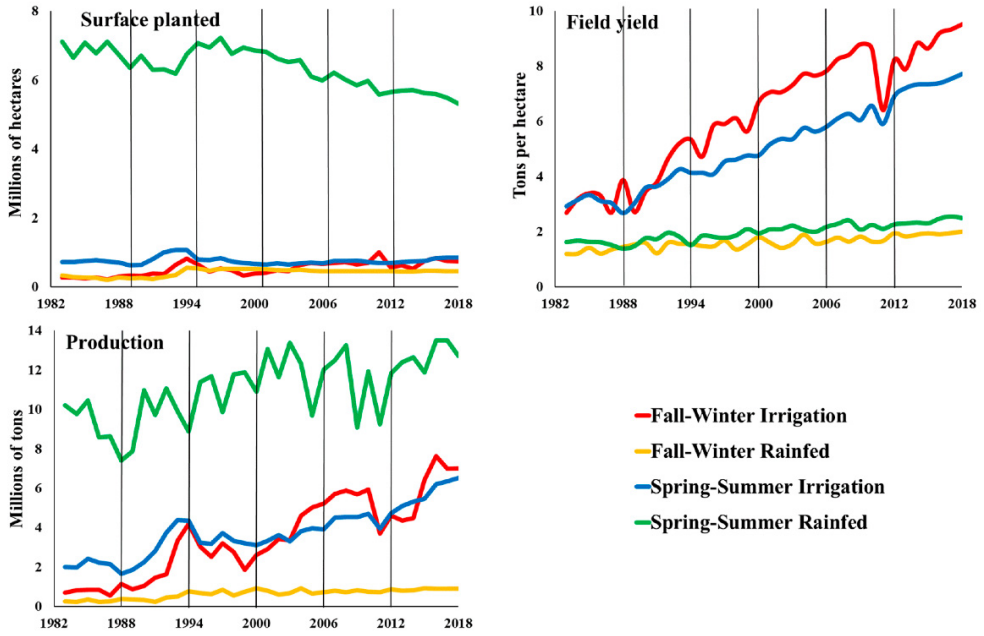
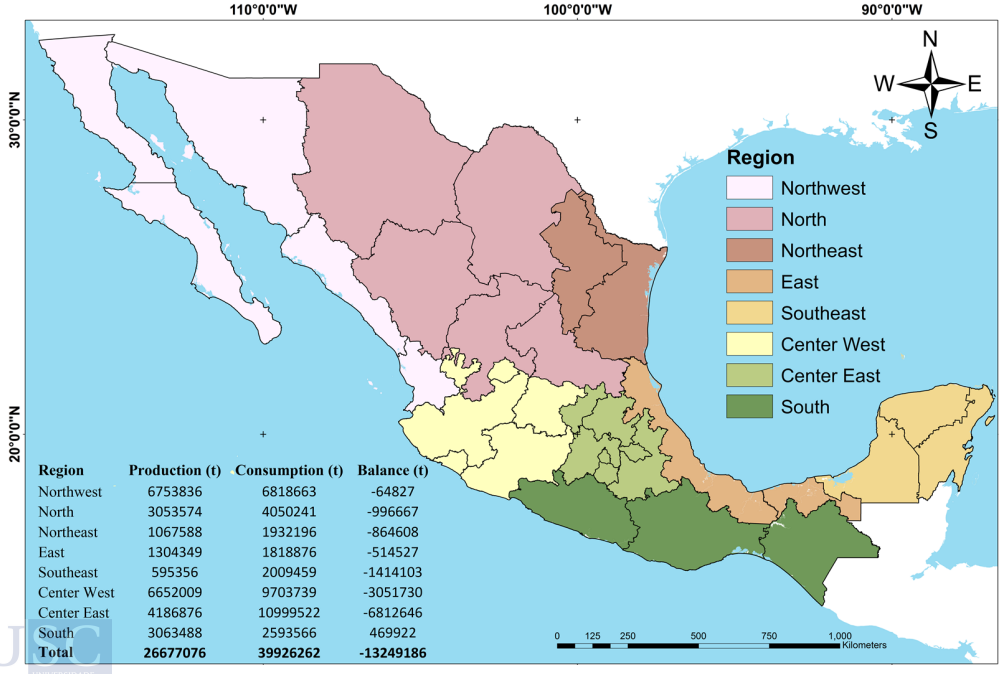


Figure 2. Temporal evolution of the surface planted, field yield, and grain maize production in Mexico from 1983 to 2018, per production cycle and water regime.



Region	Production (t)	Consumption (t)	Balance (t)
Northwest	6753836	6818663	-64827
North	3053574	4050241	-996667
Northeast	1067588	1932196	-864608
East	1304349	1818876	-514527
Southeast	595356	2009459	-1414103
Center West	6652009	9703739	-3051730
Center East	4186876	10999522	-6812646
South	3063488	2593566	469922
Total	**26677076**	**39926262**	**-13249186**

Figure 3. Agrifood balance between production and consumption of grain maize in Mexico per economic region from 2013 to 2018.

3.3. Grain Maize Productivity in Mexico

When analyzing the production of grain maize in Mexico from 1983 to 2018, through Tukey's means tests, a continuous significant increase was found in each six-year period, as a result of an improvement in the field yields that compensated the reduction of the surface planted (Table 4). However, when using the decomposition of production growth factors model proposed by [14], the apparent efficiency in the production system did not consider that the growth of grain maize productivity between six-year periods presented a decreasing trend, since it went from 16.4% in 1995–2000 compared to 1989–1994, to 6.9% in 2013–2018 compared to 2007–2012 (Table 5).

Table 4. Tukey's means test for field indicators of grain maize production in Mexico, 1983–2018.

Periods	Surface Planted (ha)	Production (t)	Field Yield (t ha^{-1})
1983–1988	8,188,027.00 ab	12,364,635.33 e	1.78 e
1989–1994	8,109,741.50 b	15,521,672.50 d	2.13 d
1995–2000	8,718,844.07 a	17,958,842.95 c	2.36 d
2001–2006	8,164,037.21 ab	20,508,540.40 b	2.80 c
2007–2012	7,794,831.34 bc	21,845,399.47 b	3.19 b
2013–2018	7,530,565.02 c	25,635,653.36 a	3.55 a

Means with the same letter per column are not statistically different (Tukey, $\alpha = 0.05$).

Table 5. Analysis of maize productivity in Mexico from1983 to 2018 obtained through the decomposition of production growth factors of the population.

Periods		Growth * (%)	Growth Factors (%)		
Initial	Final		Surface Planted	Field Yield	Interaction
1983–1988	1989–1994	15.4	−0.8	16.4	−0.2
1989–1994	1995–2000	16.4	6.3	9.4	0.7
1995–2000	2001–2006	9.8	−5.7	16.6	−1.1
2001–2006	2007–2012	8.0	−4.2	12.8	−0.6
2007–2012	2013–2018	6.9	−3.2	10.5	−0.4

* Growth (%) = Surface planted (%) ± Field yield (%) ± Interaction (%).

According to [8,25] the growth from 1983 to 2000 is explained by the strengthening of the policies for centralized support in agricultural production, technological research, guarantee prices, use of improved varieties and fertilizers, supports for commercialization, credit, and agricultural insurance. The decrease in productivity since 2001 coincides with a stage of policies for decentralized support to the farmland, where the private sector participated in technological changes, research, dissemination, and promotion of input use; and where producers made their own decisions about the destination of the subsidies contributed by the government [25]. In this regard, [18] found that the agricultural competitiveness of the local and subsistence production systems is strengthened as the government establishes mechanisms to monitor and evaluate, since in most cases the producers channel part of the subsidies as a complement to the family income.

In 2013–2018 the productivity of grain maize at the national level had a growth of 6.9% compared to 2007–2012, as a response to an increase in the efficiency of field yields (10.5%) (Table 5). When analyzing the productivity of grain maize by states, it was found that 20 out of the 32 states had growth, from which 11 were managed under a rainfed water regime and nine under irrigation (Table 6).

Villegas et al. [11] consider that the growth in grain maize productivity of rainfed areas is explained by the inclusion of federal programs such as *MasAgro* that develop regional strategies of sustainable intensification of maize production, through innovation networks composed by research platforms, demonstrative modules, and extension areas where sustainable agronomic technologies and practices are evaluated, developed and adapted, which promote the use of improved maize seeds [36]. Carpentieri-Pípolo et al. and Sales-Rocha et al. [37,38] found that native maize varieties cultivated in a traditional

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

system tend to stand out in comparison to commercial varieties in the long-term, because the native varieties have genotypes capable of responding better to abiotic and biotic stress, providing a better stability of the yield.

However, [33] found that the rainfed areas with grain maize production in Mexico are the most vulnerable to the effects of the future climate. This scenario is especially critical because nine out of the 12 states that presented reductions in their productivity are managed under rainfed conditions (categories D, E and F). The states that reduced their productivity are located mostly in the center and south of the country (Table 6), in the South economic region [20], where there is currently no deficit between production–consumption and where the greatest variety of native maize and indigenous population are concentrated [22,23].

The reduction in grain maize productivity of 12 states (categories D, E and F) represented 45.10% of the surface planted for the period of 2013–2018, with a production of 26.90% of the national total, and with average field yields of 2.15 t ha^{-1}. On the contrary, eight states (Category C) produced 52.45% of the national total in 31.28% of the surface planted with field yields higher than 10 t ha^{-1} (Table 6).

The increase in grain maize productivity of the states located in category C was because they managed to make their field yields more efficient, since their surfaces planted decreased. Two factors explained the increase in the field yields: use of improved maize seeds [11] and use of irrigation [39], whether in their totality as in the case of Sinaloa (main maize producer in Mexico) or with irrigation that aids the summer rains (rainfed) in Jalisco (second producer) and Estado de México (third producer).

However, two states that are a reference in grain maize production at the national level presented a reduction in their productivity: Guanajuato (fifth producer, category D) and Chiapas (7, F), which compromise 11.1% of the national production (Table 6). The low productivity showed by Guanajuato was due to the reduction of its field yields because of the strong competition over the use of water with other cyclic crops such as berries and vegetables [40]. For the case of Chiapas, the reconversion of the maize production areas to more profitable crops explains why both the surface planted and the field yields have decreased [41].

3.4. Indicators of GMO Maize Adoption

When adding the annual production in t per municipality from 1983 to 2018 per production cycle SS and FW, and grouping this production in class intervals: very low, low, medium, high and very high; it was found that the main grain maize-producing regions in the SS cycle were located in the states of Jalisco and Chiapas, while for the FW cycle they were located in Sinaloa and Tamaulipas. In these regions, a total of 141 surveys were applied to key producers: Jalisco (45), Chiapas (33), Sinaloa (36) and Tamaulipas (27) to determine the factors that condition the adoption of GMO maize in Mexico (Figure 4).

Mwangi and Kariuki [42] found that the factors that condition the adoption of new technologies in the production systems of small-scale agricultural producers are associated with age, schooling, size of the plot, and importance that the activity represents in the family income. When characterizing the producers from the main grain maize-producing regions in Mexico, it was found that the size of the plots and the % that the activity represents for the family income (FI) seem to condition the adoption of GMO maize (Table 7).

From the producers, 56% answered that they are willing to adopt GMO maize particularly in the regions that are managed with irrigation (Sinaloa and Tamaulipas), the remaining 44% sustained their negative in the environmental conditions (rainfed) of their production areas (Jalisco and Chiapas). Of the total producers, 94% said they were aware that the use of transgenic varieties increases production costs. Noriero-Escalante and Massieu-Trigo [43] found that the regions with commercial maize production are more prone to the adoption of GMO maize because the increase in their production costs is less significant than in the areas with subsistence production.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Table 6. Grain maize productivity by state in 2013–2018 compared to 2007–2012 obtained through the decomposition of production growth factors model.

State	Growth (%)	Growth Factors (%)			Typology	Productivity in % for the 2013–2018 Period				Water Regime *	Economic Region
		Surface Planted	Field Yield	Interaction		Surface Planted	Production	Field Yield	Ranking		
Baja California	97.4	3.4	40.5	53.5	A	0.01	0.02	7.78	32	Irrigation	Northwest
Baja California Sur	41.3	29.6	7.8	3.9	A	0.09	0.16	6.59	29	Irrigation	Northwest
Campeche	23	11.3	10.2	1.5	A	2.47	1.77	2.50	14	Rainfed	Southeast
Coahuila	18.4	9.3	8.2	0.9	A	0.41	0.14	1.27	30	Irrigation	North
Michoacán	17.2	0.2	17	0	A	6.32	7.29	4.15	4	Rainfed	Center West
Quintana Roo	26	6.1	18.4	1.5	A	1.00	0.22	0.89	27	Rainfed	Southeast
Sonora	24.3	1.5	22.4	0.4	A	0.42	0.89	7.13	19	Irrigation	Northwest
Tamaulipas	30	11.9	15.5	2.6	A	2.48	3.26	4.78	11	Irrigation	Northeast
Tlaxcala	19	1.9	16.7	0.4	A	1.62	1.40	2.93	16	Rainfed	Center East
Veracruz	3.9	0.6	3.3	0	A	7.66	4.84	2.21	8	Rainfed	East
Morelos	3.6	5.9	−2.2	−0.1	B	0.40	0.38	3.18	24	Rainfed	Center East
Nuevo Leon	24.4	78.6	−26.6	−27.6	B	0.74	0.28	1.45	25	Rainfed	Northeast
Colima	15.4	−9	27.3	−2.9	C	0.16	0.18	4.01	28	Rainfed	Center West
Chihuahua	21	0	21	0	C	2.91	5.30	6.26	6	Irrigation	North
Durango	15.6	−2.5	18.7	−0.6	C	2.24	1.36	2.16	17	Irrigation	North
Hidalgo	6.3	−2.4	8.9	−0.2	C	3.29	2.72	2.91	12	Irrigation	Center East
Jalisco	10.6	−5.5	17.1	−1	C	7.57	14.07	6.37	2	Rainfed	Center West
Estado de México	24.6	−3.4	29.3	−1.3	C	7.01	8.05	3.97	3	Rainfed	Center East
Sinaloa	0.2	−10.6	12.1	−1.3	C	7.02	20.23	10.09	1	Irrigation	Northwest
Tabasco	3.8	−6.2	10.7	−0.7	C	1.08	0.55	1.84	22	Rainfed	East
Guanajuato	−4.2	0.2	−4.4	0	D	5.26	6.20	4.07	5	Irrigation	Center West
Guerrero	−3.9	0.1	−4	0	D	6.36	4.72	2.69	9	Rainfed	South
Oaxaca	−6.5	−8.1	1.7	−0.1	E	7.37	2.63	1.29	13	Rainfed	South
Puebla	−4.4	−8.7	4.7	−0.4	E	7.21	3.90	1.89	10	Rainfed	Center East
Yucatán	−14.9	−23.8	11.2	−2.3	E	1.60	0.41	0.92	23	Rainfed	Southeast
Zacatecas	−28.9	−29.9	1.3	−0.3	E	2.69	1.48	1.97	15	Rainfed	North
Aguascalientes	−112.2	−19.9	−101.9	9.6	F	0.53	0.27	1.90	26	Irrigation	Center West
Chiapas	−14.4	−0.8	−13.7	0.1	F	9.17	4.90	1.86	7	Rainfed	South
Ciudad de México	−54.2	−49.7	−6.6	2.1	F	0.05	0.02	1.34	31	Rainfed	Center East
Nayarit	−32.8	−27.7	−6.4	1.3	F	0.50	0.59	4.12	21	Rainfed	Northwest
Queretaro	−15.3	−7.3	−8.5	0.5	F	1.43	1.14	2.76	18	Irrigation	Center East
San Luis Potosi	−12.1	−4.1	−8.3	0.3	F	2.95	0.64	1.06	20	Rainfed	North

* The states are categorized in rainfed or irrigation in function of the larger surface planted by water regime from 2013 to 2018.

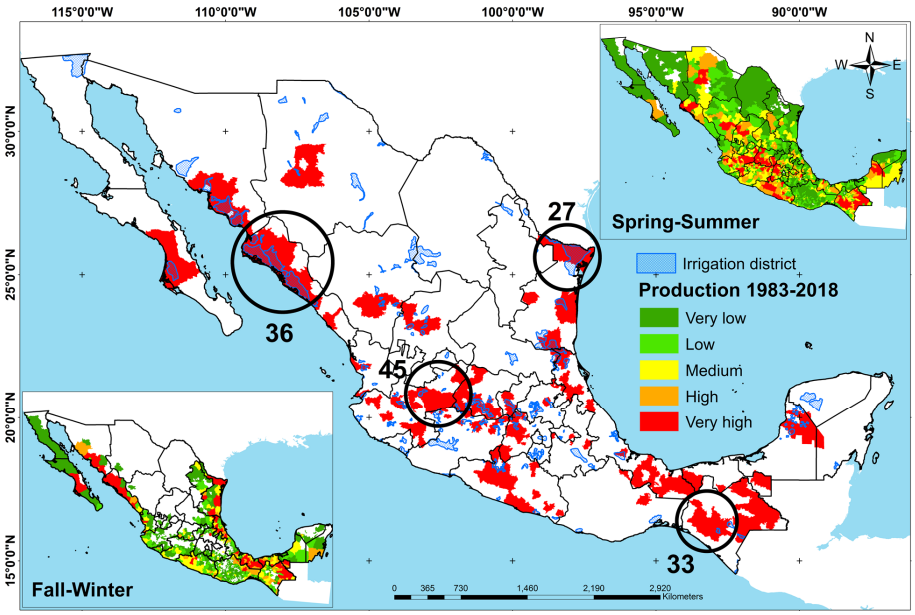


Figure 4. Main maize-producing zones in Mexico from 1983 to 2018 obtained from the sum of the production at the municipal level in the spring–summer and fall–winter cycles [19]. The circles indicate the regions where surveys were applied to key producers: Jalisco (45), Chiapas (33), Sinaloa (36) and Tamaulipas (27).

Table 7. Socioeconomic characterization of the producers in the main maize-producing regions in Mexico from 1983 to 2018.

Region	n	Year			Surface (ha)		Yield (t ha^{-1})		% FI	% GMO Adoption	
		Age	Studies	Experience	F-W	S-S	F-W	S-S		Yes	No
Sinaloa	36	57 a	9 a	37 a	8.38 a	1.76 bc	8.68 a	1.63 b	87 a	84	16
Jalisco	45	47 c	11 a	17 c	2.27 b	6.21 a	7.79 a	2.12 a	52 c	56	44
Tamaulipas	27	53 b	9 a	23 b	3.67 b	1.19 c	4.53 b	1.36 c	69 b	72	28
Chiapas	33	50 b	6 b	25 b	0.51 c	2.86 b	3.48 b	1.67 b	49 c	12	88
Mean		52	9	26	3.71	3.01	6.12	1.69	64	56	44

n = Number of surveys. % FI = % that the activity represents for the family income. Means with the same letter by column are not statistically different (Tukey, $\alpha = 0.05$).

González-Estrada and Alferes-Varela [28] found that the main problems in maize cultivation in Mexico are associated with the low productivity per the surface planted, a problem that GMO maize does not resolve, since the increase in field yields is not economically profitable with regard to the increase in production costs [24]. Hernández-Hernández et al. [25] found that the economic and agronomic potential of the adoption of genetically modified maize seeds in Mexico has been unviable because the improved seeds proposed solve problems related to resistance to glyphosate and corn budworm, factors that historically have not been a problem in the production of grain maize in Mexico.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

4. Conclusions

The agricultural policy in Mexico during the period of 2013–2018 fostered grain maize production through the Sustainable Modernization of Traditional Agriculture, compared

to the period 2007–2012, when the use of transgenic varieties was promoted. Despite these efforts to modernize the cultivation with a view of high yields through the intensive use of inputs and improved seeds, the technological changes expected were not achieved in the center and south of the country; the ancestral tradition has been stronger in the crop, associated with the greater variety of native maize varieties and a larger indigenous population. The production regions under rainfed conditions showed the greatest decreases in productivity and the lowest levels of adoption of transgenic varieties; the main reason for this exposed by producers is the increase in production costs, which is why producers prefer the cultivation of native varieties. Therefore, the agricultural policy to increase productivity ought to be directed toward the protection of subsistence farmers, revaluing the use of native and resilient varieties, and strengthening the hydro-agricultural infrastructure in rainfed areas.

Author Contributions: Conceptualization, information analysis and writing of original draft, A.S.-F.; Data review and monitoring results, Y.S.-M.; Information analysis and writing of final manuscript, J.R.V.-L.; Writing, revising and editing of the final manuscript, M.A.C.-A.; Writing, revising and editing of the final manuscript, J.E.V.-L.; Writing, revising and editing of the final manuscript, S.P.-L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data are available with the author for correspondence, at reasonable request.

Acknowledgments: This study is part of the doctoral thesis of the first author in the International Doctorate Program of Agricultural and Environmental Sciences of the Universidad de Santiago de Compostela, Spain; and to Project number 364. Sustainable productive reconversion for the development of rural producers in Campeche, assigned to the first author by the *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia* (CONACyT). To the anonymous reviewers of the article, for their comments, which helped to enrich the research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. FAOSTAT. The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. *Crops*. Available online: http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC (accessed on 17 February 2020).
2. Dyer, G.A.; Taylor, J.E. A crop population perspective on maize seed systems in Mexico. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2008**, *105*, 470–475. [CrossRef]
3. Mottaleb, K.A.; Loladze, A.; Sonder, K.; Kruseman, G.; Vicente, F.S. Threats of Tar Spot Complex disease of maize in the United States of America and its global consequences. *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Chang.* **2019**, *24*, 281–300. [CrossRef]
4. Santillán-Fernández, A.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Bautista-Ortega, J.; Pereira-Lorenzo, S. Spatial Delimitation of Genetic Diversity of Native Maize and Its Relationship with Ethnic Groups in Mexico. *Agronomy* **2021**, *11*, 672. [CrossRef]
5. SIAP. Atlas Agroalimentario 2012–2018: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Available online: https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018 (accessed on 23 January 2021).
6. INEGI. México en Cifras: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Available online: https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=00 (accessed on 15 February 2020).
7. González-Merino, A.; Ávila-Castañeda, J.F. El maíz en Estados Unidos y en México: Hegemonía en la producción de un cultivo. *Argumentos* **2014**, *27*, 215–237.
8. Sánchez-Cano, J.E.S. La política agrícola en México, impactos y retos. *Rev. Mex. Agronegocios* **2014**, *35*, 946–956.
9. Corte-Cruz, P.S.; Carrillo-Huerta, M.M. Impactos del Programa Procampo en la producción de maíz y frijol en México, 2000–2010. *EconoQuantum* **2018**, *15*, 95–112. [CrossRef]
10. Espinosa-Calderón, A.; Turrent-Fernández, A.; Tadeo-Robledo, M.; Vicente-Tello, S.; Gómez-Montiel, N.; Valdivia-Bernal, R.; Sierra-Macias, M.; Zamudio-González, B. Ley de Semillas y Ley Federal de Variedades Vegetales y transgénicos de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas* **2014**, *5*, 293–308. [CrossRef]
11. Villegas, M.N.O.; Villarreal, L.Z.; Salvatierra, N.M.; Lara, O.G.H. Leyes de semillas y maíz transgénico. Análisis desde la co-producción entre ciencia y regímenes económico-políticos en México. *Agric. Soc. Y Desarro.* **2018**, *15*, 413–442. [CrossRef]

12. Santillán-Fernández, A.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Pereira-Lorenzo, S. Spatial-Temporal Evolution of Scientific Production about Genetically Modified Maize. *Agriculture* **2021**, *11*, 246. [CrossRef]
13. Santillán-Fernández, A.; Santoyo-Cortes, V.H.; García-Chávez, L.R.; Covarrubias-Gutiérrez, I. Dinámica de la producción cañera en México: Periodo 2000 a 2011. *Agroproductividad* **2014**, *7*, 23–29.
14. Gómez-Oliver, L. *La Política Agrícola en el Nuevo Estilo de Desarrollo Latinoamericano*; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: Santiago, Chile, 1994; p. 675.
15. Cruz-Delgado, D.; Leos-Rodríguez, J.A.; Altamirano-Cárdenas, J.R. México: Factores explicativos de la producción de frutas y hortalizas ante la apertura comercial. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* **2013**, *19*, 267–278. [CrossRef]
16. Schwentesius, R.R.; Sangerman, J.D.M. Desempeño competitivo de la fruticultura mexicana, 1980–2011. *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas* **2014**, *5*, 1287–1300. [CrossRef]
17. Santillán-Fernández, A.; Salas-Zúñiga, A.; Vásquez-Bautista, N. La productividad de la vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews) en México de 2003 a 2014. *Rev. Mex. Cienc. For.* **2018**, *9*, 50–69. [CrossRef]
18. Soto, J.L.; Hartwich, F.; Monge, M.; Ampuero, L. *Innovación en el Cultivo de Quinua en Bolivia: Efectos de la Interacción Social y de las Capacidades de Absorción de los Pequeños Productores*; International Food Policy Research Institute: Washington, DC, USA, 2006; p. 95.
19. SIAP. Producción Agrícola: Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Available online: http://www.numerosdelcampo.sagarpa.gob.mx/publicnew/productosAgricolas (accessed on 25 September 2020).
20. Mendoza-Vargas, M. Ángel Bassols Batalla y la renovación de la geografía mexicana. *Terra Bras.* **2017**, *9*, 1–18. [CrossRef]
21. Hernández-Vidal, N. Territorializando STS: An analysis of current discussions about agro-biotechnology governance in Latin America, Europe, and the USA. *Tapuya* **2018**, *1*, 70–83. [CrossRef]
22. Ureta, C.; González-Salazar, C.; González, E.J.; Álvarez-Buylla, E.R.; Martínez-Meyer, E. Environmental and social factors account for Mexican maize richness and distribution: A data mining approach. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2013**, *179*, 25–34. [CrossRef]
23. Perales, H.; Golicher, D. Mapping the diversity of maize races in Mexico. *PLoS ONE* **2014**, *9*, e114657. [CrossRef]
24. Chauvet, M.; Lazos, E. El maíz transgénico en Sinaloa: ¿tecnología inapropiada, obsoleta o de vanguardia? Implicaciones socioeconómicas de la posible siembra comercial. *Sociológica/México* **2014**, *29*, 7–44.
25. Hernández-Hernández, B.; Rendón-Medel, R.; Toledo, J.U.; Santoyo-Cortés, V.H. Potencial económico y agronómico de la adopción de semillas de maíz genéticamente modificado en México. *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas* **2016**, *7*, 3051–3061.
26. Huffman, W.E.; Jin, Y.; Xu, Z. The economic impacts of technology and climate change: New evidence from US corn yields. *Agric. Econ.* **2018**, *49*, 463–479. [CrossRef]
27. Hufford, M.B.; Berny-Mier y Teran, J.C.; Gepts, P. Crop biodiversity: An unfinished magnum opus of nature. *Annu. Rev. Plant. Biol.* **2019**, *70*, 727–751. [CrossRef] [PubMed]
28. González-Estrada, A.; Alferes-Varela, M. Competitividad y ventajas comparativas de la producción de maíz en México. *Rev. Mex. Cienc. Agrícolas* **2010**, *1*, 381–396.
29. Valencia-Romero, R.; Sánchez-Bárcenas, H.; Robles-Ortiz, D. Soberanía Alimentaria de granos básicos en México: Un enfoque de cointegración de Johansen a partir del TLCAN. *Análisis Económico* **2019**, *34*, 223–248. [CrossRef]
30. Los Santos-Ramos, D.; Romero-Rosales, T.; Bobadilla-Soto, E.E. Dinámica de la producción de maíz y frijol en México de 1980 a 2014. *Agron. Mesoam.* **2017**, *28*, 439–453. [CrossRef]
31. LDRS. Ley de Desarrollo Rural Sustentable. *Diario Oficial de la Federación. Camara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Ciudad de México*. Available online: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/235_120419.pdf (accessed on 7 April 2020).
32. Donnet, M.L.; López-Becerril, I.D.; Black, J.R.; Hellin, J. Productivity differences and food security: A metafrontier analysis of rain-fed maize farmers in MasAgro in Mexico. *Aims Agric. Food* **2017**, *2*, 129–148. [CrossRef]
33. Murray-Tortarolo, G.N.; Jaramillo, V.J.; Larsen, J. Food security and climate change: The case of rainfed maize production in Mexico. *Agric. For. Meteorol.* **2018**, *253*, 124–131. [CrossRef]
34. Palacios-Argüello, L.; Morganti, E.; González-Feliu, J. Food hub: Una alternativa para alimentar las ciudades de manera sostenible. *Rev. Transp. Territ.* **2017**, *17*, 10–33. [CrossRef]
35. Sosa-Baldivia, A.; Ruíz-Ibarra, G. La disponibilidad de alimentos en México: Un análisis de la producción agrícola de 35 años y su proyección para 2050. *Pap. Población* **2017**, *23*, 207–230. [CrossRef]
36. Sánchez-Toledano, B.I.; Kallas, Z.; Gil, J.M. Importancia de los objetivos sociales, ambientales y económicos de los agricultores en la adopción de maíz mejorado en Chiapas, México. *Rev. La Fac. Cienc. Agrar. Uncuyo* **2017**, *49*, 269–287.
37. Carpentieri-Pípolo, V.; Souza, A.D.; Silva, D.A.D.; Barreto, T.P.; Garbuglio, D.D.; Ferreira, J.M. Avaliação de cultivares de milho crioulo em sistema de baixo nível tecnológico. *Acta Sci. Agron.* **2010**, *32*, 229–233. [CrossRef]
38. Sales-Rocha, R.; Rodríguez-Nascimento, M.; Barroso-Chagas, J.T.; Nunes de Almeida, R.; Ricardo dos Santos, P.; Queiroz da Silva Sanfim de Sant'Anna, C.; Pureza da Cruz, D.; Danilo da Silva-Costa, K.; Amaral-Gravina, G.; Figueiredo-Daher, R. Association among Agro-morphological Traits by Correlations and Path in Selection of Maize Genotypes. *J. Exp. Agric. Int.* **2019**, *34*, 1–12. [CrossRef]
39. Juárez-Hernández, S.; Pardo, C.S. Assessing the potential of alternative farming practices for sustainable energy and water use and GHG mitigation in conventional maize systems. *Environ. Dev. Sustain.* **2020**, *22*, 8029–8059. [CrossRef]

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

40. García-Rodríguez, J.G.; Mendoza-Elos, M.; Cervantes-Ortiz, F.; Ramirez-Pimentel, J.G.; Agrirre-Mancilla, C.L.; Gracía-Perea, M.A.; Figueroa-Rivera, M.G.; Rodríguez-Pérez, G.; Rodríguez-Herrera, S.A. Adaptabilidad de híbridos precomerciales tropicales de maíz en el Bajío de Guanajuato, México. *Rev. Investig. Agrar. Y Ambient.* **2019**, *10*, 57–65. [CrossRef]
41. Pérez-Pérez, E.F.; Villafuerte-Solís, D. El dilema de los campesinos frente a los imperativos del mercado neoliberal en Los Altos de Chiapas, México. *Estud. Rural.* **2019**, *9*, 1–18.
42. Mwangi, M.; Kariuki, S. Factors determining adoption of new agricultural technology by smallholder farmers in developing countries. *J. Econ. Sustain. Dev.* **2015**, *6*, 208–216.
43. Noriero-Escalante, L.; Massieu-Trigo, Y.C. Campesinos maiceros en Tlaxcala: Viabilidad, caracterización y respuestas ante el maíz transgénico. *Soc. Y Ambiente* **2018**, *16*, 179–206. [CrossRef]

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

agronomy

MDPI

Article

Spatial Delimitation of Genetic Diversity of Native Maize and Its Relationship with Ethnic Groups in Mexico

Alberto Santillán-Fernández [1,2], Yolanda Salinas-Moreno [3], José René Valdez-Lazalde [4], Jaime Bautista-Ortega [5] and Santiago Pereira-Lorenzo [6,*]

[1] Catedrático-Conacyt, Colegio de Postgraduados Campus Campeche, 24450 Champotón, Campeche, Mexico; santillan.alberto@colpos.mx
[2] International Doctorate Program of Agricultural and Environmental Sciences, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, 27002 Lugo, Spain
[3] Department of Genetic, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campus Altos de Jalisco, 47600 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, Mexico; salinas.yolanda@inifap.gob.mx
[4] Department of Forestry, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, 56230 Texcoco, Mexico; valdez@colpos.mx
[5] Department of Agricultural Sciences, Colegio de Postgraduados Campus Campeche, 24450 Champotón, Campeche, Mexico; jbautista@colpos.mx
[6] Department of Plant Production and Engineering Projects, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, Galicia, 27002 Lugo, Spain
* Correspondence: santiago.pereira.lorenzo@usc.es; Tel.: +34-629-83-71-26

Abstract: Mexico, as a center of origin of maize, presents a high diversity of maize races. With the objective of spatially demarcating regions with high concentration of intraspecific diversity in Mexico, as a fundamental measure for the in situ conservation of their agrobiodiversity, Geographic Information Systems (GIS) tools have been used to generate diversity and richness indexes for 64 maize races cultivated in Mexico, using indexes to demarcate relationships to environmental factors such as temperature, precipitation, and altitude; the presence of indigenous groups; and the type of maize used. These relations allowed defining seven environmental units spatially, with characteristic maize races in each of them, which constitute priority areas for in situ conservation. In addition, a close relationship was found between the diversity of maize races and of ethnic groups, from the center to the south of the country, associated with the differences in maize use in different ethnic groups. This geographical demarcation of races and uses of maize will favor food security through specific measures of in situ conservation, as well as an increase in added value of maize by-products based on specific maize races conserved by local ethnic groups.

Keywords: *Zea mays* L.; diversity of crops; maize races; intraspecific diversity

check for updates

Citation: Santillán-Fernández, A.; Salinas-Moreno, Y.; Valdez-Lazalde, J.R.; Bautista-Ortega, J.; Pereira-Lorenzo, S. Spatial Delimitation of Genetic Diversity of Native Maize and Its Relationship with Ethnic Groups in Mexico. *Agronomy* **2021**, *11*, 672. https://doi.org/10.3390/agronomy11040672

Academic Editor: Abdulqader Jighly

Received: 26 February 2021
Accepted: 29 March 2021
Published: 1 April 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Mexico is considered the center of origin of maize (*Zea mays* L.) and is home to a large diversity of maize races, each one adapted to different environmental conditions and agricultural systems [1,2]. These races are cultivated in a broad range of altitudes and precipitation regimes (from sea level up to around 3000 masl, of less than 400 mm to more than 3000 mm of rainfall per year). As a result, the races vary in plant size and tolerance to heat, cold, and water needs [3].

Around 64 maize races are cultivated in Mexico [4], representing 60% of maize diversity in the world [1]. The importance of maize for the Mexican population has been thoroughly described, from several points of view, as center of origin [5–7], center of domestication [8,9], basic food [10], and even as a factor that has allowed the development of ethnic groups [3,11].

The analysis of biodiversity in the centers of origin is crucial for the in situ conservation of species [12–15]. However, studies at the national level to identify priority areas for in situ

conservation of genetic maize resources in Mexico are scarce [16,17]. Most studies have centered on ex situ conservation through the creation of germplasm banks and have been limited to describing the geographic distribution of the races [4,12]. Studies about the interaction between environmental, sociocultural, and economic factors that impact maize agricultural production systems most are also limited [3,18–20].

Identification of priority areas for in situ conservation can help to plan agricultural activities better and decrease the vulnerability of production when facing environmental threats [3,21,22]. It also contributes to satisfying specific cultural or social needs and even to stopping the adoption of new technologies such as genetically modified organisms that compromise the diversity of the species [23–25].

The authors of [26] found evidence of loss of maize varieties in Mexico, which is why they suggested that the reduction of varietal diversity could make it difficult for farmers to select races adapted to current climate variation, reducing the field yields. These losses in yield would lead, in turn, to farmers abandoning the sector and, therefore, to a greater loss of maize diversity in Mexico.

The authors of [27,28] suggest that, in order to preserve species diversity, the spatial analysis using Geographic Information Systems (GIS) can be a good tool when different types of spatial and temporal information are connected, as shown in studies about potato [29], papaya [30], manioc [31], and, more recently, maize [3,7,18–20], in particular, when richness and diversity indexes are incorporated that allow demarcating priority areas for the conservation of maize agrodiversity, analyzed from a territorial approach [3]. Due to the simplicity of their calculation and the reliability of their results, the Shannon, Simpson, and Margalef diversity indexes are commonly used in studies on conservation and use of plant genetics resources [28].

Recently, the authors of [7,18,19] analyzed the geographical variation of maize diversity in Mexico using indicators of richness and diversity. However, in their studies they did not analyze intraspecific diversity or the relationship of ethnic groups with the territorial diversity of races and specific maize uses.

To address this problem, in this study we set out the objective of demarcating regions with a high concentration of intraspecific diversity of maize in Mexico, through GIS tools that relate environmental factors, such as temperature, precipitation, and altitude, with the presence of ethnic groups and the type of maize used. The initial hypothesis was that the diversity of maize races is associated with the territorial diversity of ethnic groups, contributing to the domestication process, with specific uses per race. This geographic delimitation of maize races and uses would favor food security through specific measures for conservation, as well as an increase in the added value of maize by-products based on specific maize races conserved by local ethnic groups.

2. Materials and Methods

2.1. Databases

In this study, 18,812 georeferenced records of 64 cultivated maize races in Mexico were included, and 1570 of its wild relative, teosinte [32], were integrated in a database available on the website of the National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity (CONABIO) [4]. The 20,382 records have an identifier that groups them into maize and teosinte races (Figure 1), year of collection (1927 to 2010), maize uses (grain and plant), and geographic coordinates (longitude, latitude).

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

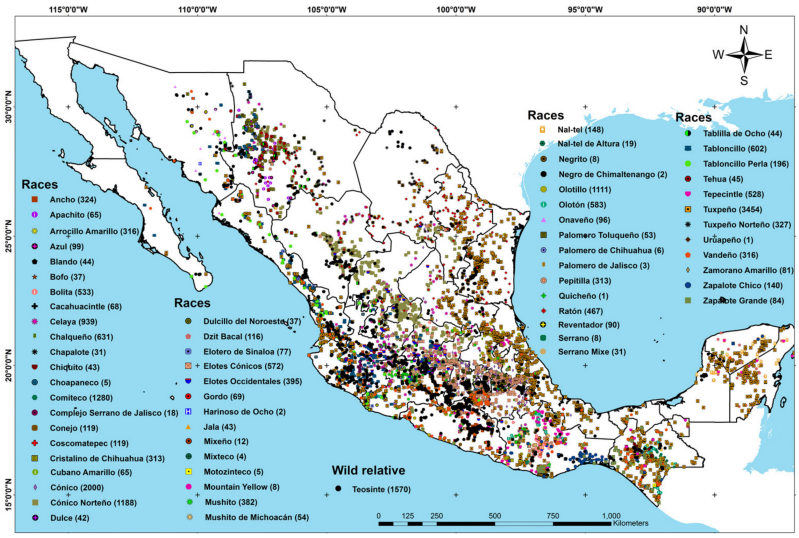


Figure 1. Spatial distribution of maize races in Mexico and their wild relative teosinte. The number of records per race is shown in parentheses.

2.2. Spatial Delimitation of the Regions of Genetic Richness per Maize Race

The methodology used to determine genetic richness zones was based on the spatial analysis of the geographic distribution of the collections of 64 maize races. For this purpose, the collections per race were grouped and their genetic richness zone was modelled in the software DivaGis v7.5 [33] with the module Analysis/Point to Grid/Richness. In the case of the races with low representativeness (less than 30 collections), buffer zones of 5-km radius were generated for each collection, because it was considered that there is high probability that the genetic material collected is distributed in this area [34].

The richness zone for the races with more than 30 collections was calculated race by race and consisted in dividing the country's map into grids of five min (0.083 sexagesimal degrees) with a vicinity of one sexagesimal degree that is equivalent to an area of 9 km by 9 km, a size recommended for national studies [35]. DivaGis makes a count of the number of collections in each grid and groups the grids into five class intervals by the number of observations present. For purposes of this study, four class intervals were taken with higher number of observations.

According to the methodology described for the determination of centers of origin and centers of genetic diversity of maize in Mexico [36], the regions generated by the buffer zones for the collections of races with less than 30 observations and the richness zones for the races with more than 30 observations were intersected with the records of wild relatives (teosinte) and those regions without presence of wild relatives were distinguished. The resulting regions were called genetic richness regions.

2.3. Spatial Delimitation of Intraspecific Maize Diversity

To determine the spatial intraspecific diversity of the 64 maize races grown in Mexico, the geographic distribution of their collections was used and specific richness and structure indexes were modeled in the software DivaGis v7.5 [33] with the Analysis/Point to Grid/Diversity module. To calculate the indexes, the country's map was divided into grids of five min (0.083 sexagesimal degrees) with a vicinity of one sexagesimal degree that is equivalent to an area of 9 km by 9 km [35].

The specific richness indexes that were calculated were those by Margalef and Menhinick, which measured the number of races present per grid (9 km by 9 km) without taking

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

into consideration the proportional abundance of their collections [37]. For the structure indexes, those by Shannon, Brillouin, and Simpson were calculated, which, in contrast with the specific richness indexes, did consider the proportion of the number of collections per maize race inside the grid [37].

According to the index used, DivaGis counts the number of races in each grid and groups the grids into five class intervals in ascendant order by the number of races present [33]. To simplify the interpretation of the results, the five class intervals per index were reclassified as very low diversity, which corresponded to the class interval (1), low (class interval (2)), medium (3), high (4), and very high (5).

For the purposes of this study, the common areas with medium, high, and very high diversity of the specific richness indexes (Margalef and Menhinick) and structure indexes (Shannon, Brillouin, and Simpson) were taken into account, which were demarcated through a process of map intersection in DivaGis v7.5 [33]. The resulting polygons were called regions with intraspecific diversity of maize.

2.4. Spatial Delimitation of the Maize Diversity Center

Reference [36] defines diversity centers as those regions where populations of wild relatives coexist with populations of races or varieties of the cultivated species. In this study, the maize diversity center was defined spatially based on the union of the georeferenced regions of: (1) genetic richness, (2) intraspecific diversity, and (3) centers of origin and domestication of maize described by Kato for Mexico [38].

2.5. Characterization of the Maize Diversity Center by Climate Factors

Considering that the maize diversity center identified covers different regions of Mexico, each with different climate patterns that give special characteristics to the maize races cultivated in these regions [1], a regionalization was made to differentiate the climatic conditions inside the diversity center. For this purpose, the geographic layer of the diversity center was combined with the geographic layers of altitude (masl), mean annual precipitation (mm), mean annual temperature (°C), and temperature regime (with categories from very dry to very humid) available in CONABIO's geoportal [39]. The geographic layers were combined with the intersect tool of the GvSIG v2.3.1 software [40], according to the Methodology of Environmental Units by Gómez-Orea [41].

2.6. Relationship of Environmental Units with Ethnic Groups and Maize Uses

Once the environmental units were characterized by climatic factors, the principal races of maize cultivated in each of them were identified. Therefore, the number of collections per maize race in each environmental unit was counted and the percentage represented by the total per race was obtained. The races whose percentage of collections in the environmental unit was higher compared to the other environmental units were considered as principal races. For those cases where a race presented higher percentages than 10% in two or more environmental units, they were considered as a secondary race.

Once the principal races per environmental unit were determined, the ethnic groups and maize uses (grain and plant) in each environmental unit were territorially associated. The spatial distribution of ethnic groups in Mexico was obtained from the National Commission for the Development of Indigenous Peoples [42]. For the case of maize uses, 11 uses were defined for the grain and four for the plant, based on the information available in the database by CONABIO [4,10] (Table S1).

Finally, to determine the relationship that ethnic groups in Mexico have had in the past with the process of maize domestication, the number of ethnic groups in each environmental unit was associated with the corresponding number of collections, number of races, number of principal races, and number of maize uses (grain and plant). For these, Pearson's coefficient of correlation was calculated with the statistical software R [43].

In the case of the number of maize uses (grain and plant) in each environmental unit, an index of uses for principal races was heuristically constructed, with mathematical limits

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

in the [0, 1] interval. Theoretically, the value 0 implies that out of the 15 probable uses according to CONABIO [4,10], none of the principal races in the environmental unit is used. On the contrary, the value 1 can only be observed if the environmental unit contains the total of principal races (64) and each one of them is used in the 15 possible uses.

For the creation of the index, it was reclassified as 1 if the principal race in the environmental unit presented the corresponding use and 0 in the contrary case. The mathematical expression was the following:

$$IU_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{15} U_{jk}}{(64)(15)} \qquad i = 1, \ldots, 7; j = 1, \ldots, n_i; k = 1, \ldots, 15$$

where

$IU_i =$ Index of uses for the environmental unit i,
$U_{jk} =$ Value given for the k use of the principal race j in the environmental unit i, and
$n_i =$ Number of principal races in the environmental unit i.

3. Results

3.1. Spatial Delimitation of the Genetic Richness Regions per Maize Race

A database analysis with 18,812 collections of the 64 maize races cultivated in Mexico allowed identifying 49 races with more than 30 records and 15 more with fewer than 30 records. Based on the methodology suggested in this study, the richness region for each race with more than 30 collections was demarcated as genetic richness region (Figure S1) and for those with fewer than 30 collections, a buffer zone of 5-km radius was generated for each collection (Figure S2).

For the sum of the regions generated by the 64 races cultivated in Mexico, the presence of the wild relative teosinte was verified, ruling out those regions without presence of teosinte (Figure S3). The resulting regions were called genetic richness regions, whose geographic distribution covered wide zones in Mexico, with greater territorial coverage in the center-south of the country (Figure 2).

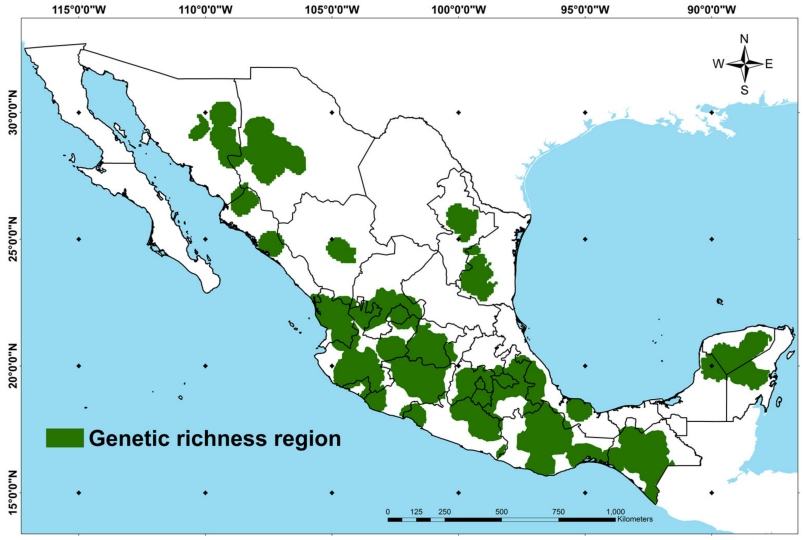


Figure 2. Genetic richness region for the 64 maize races cultivated in Mexico.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

3.2. Spatial Delimitation of Intraspecific Maize Diversity

When calculating the specific richness indexes (Margalef and Menhinick) and structure indexes (Shannon, Brillouin, and Simpson) of the geographic distribution of 64 maize races cultivated in Mexico, it was found that the structure indexes demarcated broader regions of intraspecific diversity in the categories defined from high to very high. In addition, in contrast with the specific richness indexes, the structure indexes did demarcate regions of medium to high intraspecific diversity in the Yucatan Peninsula (Figure S4).

In the methodological proposal of this study, it was decided to consider only the common areas with medium to very high intraspecific diversity both of the specific richness and the structure indexes, since, according to [37,44], when considering only one diversity index there is the risk of under- or overestimating the diversity. Figure 3 shows that the common areas with medium to very high intraspecific diversity of the indexes calculated were concentrated in the center to north of Mexico.

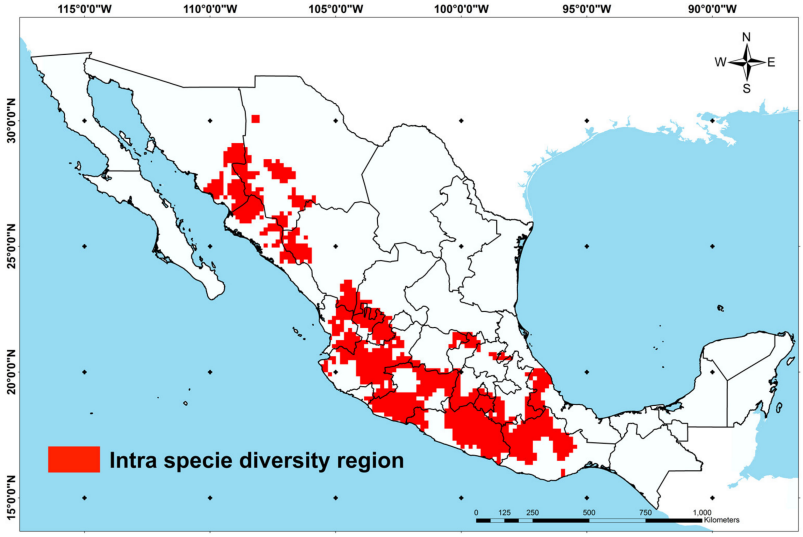


Figure 3. Spatial distribution of the common areas with medium to very high intraspecific diversity for the 64 races of maize cultivated in Mexico, from specific richness indexes (Margalef and Menhinick) and structure indexes (Shannon, Brillouin, and Simpson).

3.3. Spatial Delimitation of the Maize Diversity Center

The spatial delimitation of the maize diversity center in Mexico was defined from the union of the maize genetic richness region, the maize intraspecific diversity region, and the centers of origin and domestication of maize established for Mexico (Figure S5) [38]. Figure 4 shows that the union of the three regions allowed complementing areas, which helped to include races that may have not been contemplated by one of the three regions that make up the maize diversity center.

For example, the intraspecific diversity region did not contemplate areas in the southeast or northeast of Mexico, which were included in the genetic richness region of maize. The races Dzit Bacal and Nal-tel are grown in the southeast of Mexico, which were not cultivated in any other region of the country. The same happens for the Tuxpeño Norteño race, which is grown mostly in the northeast of Mexico [1].

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

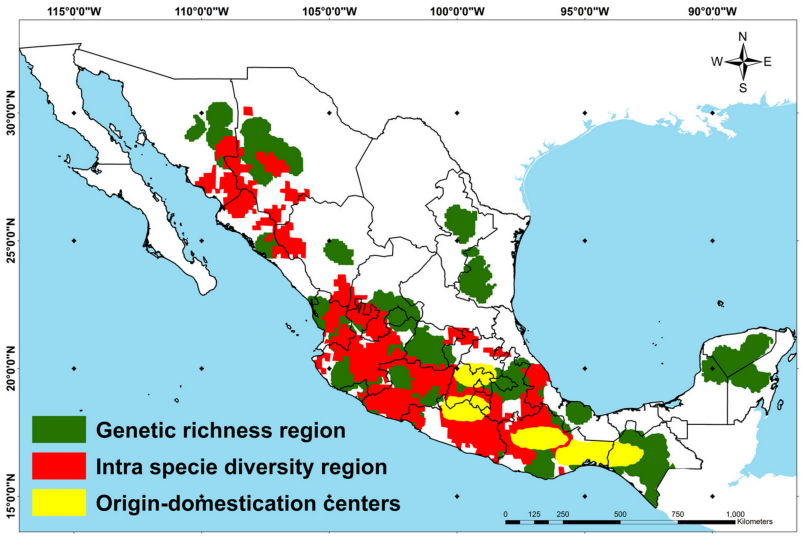
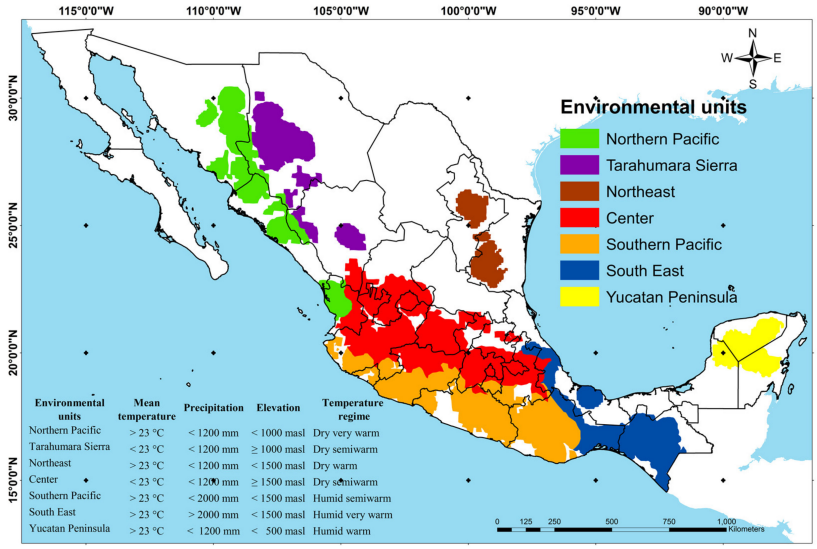


Figure 4. Spatial delimitation of the maize diversity center in Mexico obtained from the union of the maize genetic richness region, the maize intraspecific diversity region, and the centers of origin and domestication of maize established for Mexico.

3.4. Characterization of the Maize Diversity Center by Climatic Factors

The characterization by environmental units of the diversity center allowed differentiating into seven environmental units with different climatic thresholds: North Pacific, Sierra Tarahumara, Northeast, Center, South Pacific, Southeast, and Yucatan Peninsula. As shown in Figure 5, the environmental units in the north of the country were characterized by dry climates, those in the center by warm climates, and those in the south by humid climates, which confers unique characteristics to the races that are cultivated in each environmental unit [1].



Environmental units	Mean temperature	Precipitation	Elevation	Temperature regime
Northern Pacific	> 23 °C	< 1200 mm	< 1000 masl	Dry very warm
Tarahumara Sierra	< 23 °C	< 1200 mm	≥ 1000 masl	Dry semiwarm
Northeast	> 23 °C	< 1200 mm	< 1500 masl	Dry warm
Center	< 23 °C	< 1200 mm	≥ 1500 masl	Dry semiwarm
Southern Pacific	> 23 °C	< 2000 mm	< 1500 masl	Humid semiwarm
South East	> 23 °C	> 2000 mm	< 1500 masl	Humid very warm
Yucatan Peninsula	> 23 °C	< 1200 mm	< 500 masl	Humid warm

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Figure 5. Spatial delimitation of the seven environmental units that were differentiated when characterizing the maize diversity center in Mexico by climatic factors.

3.5. Relationship of Environmental Units with Ethnic Groups and Maize Uses

When associating the number of collections from the total that were analyzed in this study (18,812), the number of races cultivated in Mexico (64), the number of principal races, ethnic groups, and indexes of maize grain and plant uses inside each environmental unit, it was found that 84.65% (15,925) of the total collections were included in one of the seven environmental units (Table 1). In addition, the 64 races cultivated in Mexico were grouped exclusively in the seven environmental units with specific uses of grain and plant, and ethnic groups associated territorially to the geographic distribution of the maize races. For the case of the races with broad distribution such as Ratón and Tuxpeño, it was possible to differentiate them as secondary races in one or more environmental units (Table S2).

Table 1. Number of collections, number of races, number of principal races, ethnic groups, and index of maize grain and plant uses inside each environmental unit.

Environmental Unit	Collections		Races		Principal Races		Ethnic Groups		Index of Maize Grain and Plant Uses (IU)		
	Number	% Total	Number	% Total	Number	% Total	Number	% Total	$\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{k=1}^{15} U_{jk}$	(64)(15)	IU_i
North Pacific	516	2.74	25	39.06	7	10.94	7	11.11	45	960	0.05
Tarahumara Sierras	993	5.28	25	39.06	5	7.81	3	4.76	35	960	0.04
Northeast	379	2.01	8	12.50	2	3.13	0	0.00	16	960	0.02
Center	6010	31.95	49	76.56	23	35.94	18	28.57	162	960	0.17
South Pacific	3340	17.75	44	68.75	14	21.88	17	26.98	96	960	0.10
South East	4196	22.30	33	51.56	11	17.19	24	38.10	82	960	0.09
Yucatán Peninsula	491	2.61	8	12.50	2	3.13	5	7.94	17	960	0.02
Sum	15,925	84.65			64	100.00					
Total	18,812	100.00	64	100.00	64	100.00	63	100.00			

Table 1 shows the Center, South Pacific, and Southeast environmental units that are located in warm and semi-warm regions with annual precipitations over 1200 mm and average altitude of 1500 masl, concentrating the highest number of collections, number of races (total number of races without considering the proportion of collections in the environmental unit), and number of principal races (number of races with the highest proportion of collections in the environmental unit). In these environmental units, the highest indexes of use (grain and plant) were also obtained, and they are where territorially there is higher presence of ethnic groups (Figure S6).

Finally, the results from Pearson's correlation analysis showed that in the environmental units where there is a higher number of ethnic groups, the number of maize races and their uses (grain and plant) tend to be higher (Figure 6).

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

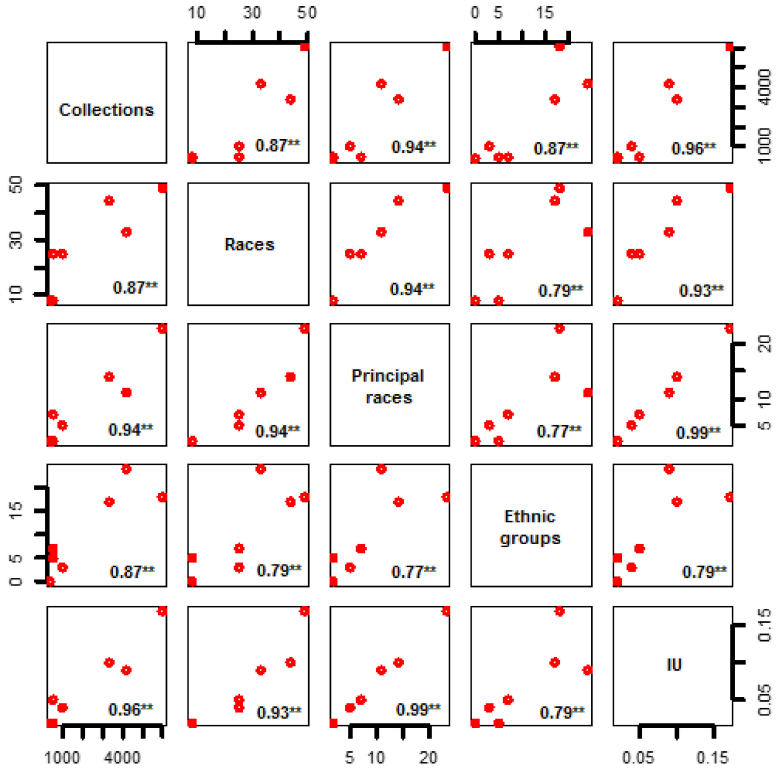


Figure 6. Scatterplot matrix of Pearson's correlation coefficient that associates the presence of ethnic groups in the environmental units with the number of collections, number of races, number of principal races, and index of maize uses (grain and plant) (n = 7). ** $p < 0.05$.

4. Discussion

4.1. Spatial Delimitation of the Genetic Richness Regions per Maize Race

The use of a database with the geographic distribution of 18,812 collections of the 64 maize races cultivated in Mexico allowed identifying regions of genetic richness and intraspecific diversity of maize at the national level. However, differences must be considered in the racial classification. For example, the authors of [45] reported a database for Oaxaca where they include races such as Negro de Tierra Fría, Negro Mixteco, Olotón Imbricado, and Serrano de Oaxaca. These races were not identified in the database used in this study [4].

In addition to the differences in racial classification, in the database used, 15 out of the 64 races analyzed had fewer than 30 collections, and the calculation of indexes of intraspecific diversity with GIS increases its reliability as the number of georeferenced records is higher than 30 [44]. Considering this, two specific richness indexes were calculated (which did not consider the proportional abundance of the collections) and three structure indexes (which did consider the proportional abundance of the collections), and the areas in common of the five indexes with medium to very high indexes were demarcated, which, according to [37], increase the reliability in estimating the intraspecific diversity.

In contrast with studies, such as those by the authors of [7], who defined a maize diversity center in Mexico based on the union of genetic richness regions of 54 maize races, and [18], who found 11 biogeographical regions for maize in Mexico when considering 47 maize races, our study analyzed 64 maize races and defined the diversity center as

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

the sum of the georeferenced regions of genetic richness, intraspecific diversity, and centers of origin and domestication of maize described by Kato [38]. This allowed demarcating a spatially larger diversity center, where the diversity of a higher number of maize races was considered.

With the methodology proposed, the diversity center was characterized into environmental units with different climatic conditions, and in each environmental unit the principal races cultivated in it were associated with maize uses (grain and plant) and ethnic groups. Therefore, in contrast with studies, such as those by the authors of [1,46], which analyzed the spatial relationships of environmental factors (altitude, climate, slope, and soil) with the spatial distribution of maize races, our study also relates these aspects with the presence of ethnic groups linked territorially to the maize crop, which is why this fact can help to redirect the in situ conservation policies in a focal and localized way.

4.2. Environmental Units

Because of the patterns of temperature, precipitation, and altitude, seven environmental units were differentiated with a different moisture regime. The authors of [46] found that the altitude, related to the humidity, is the factor that agrees most with the spatial distribution of maize races in Mexico.

The authors of [18], based on the racial composition of maize, defined 11 biogeographical regions in Mexico, which contain 73% of the diversity in races described by the authors of [4]. In contrast with the work by the authors of [18], our study contemplated 100% of the races described by the authors of [4] and the characterization by environmental units allowed defining climatic conditions in each one of the seven environmental units which, according to the authors of [1], condition the phenology, cultivation, and agronomic management of maize.

The authors of [19], when using the hierarchical clustering technique on the racial composition of maize, found that the highest richness and diversity of maize races in Mexico is found in the center to south of the country; this finding agrees with our results. However, the spatial resolution that they [19] used was 50 km, and in our case it was 9 km, which, according to [35], allows higher accuracy in territory delimitation.

The concentration of a higher number of maize races from the center to the south of the country is an aspect that has been widely documented [18,19,38]. However, in contrast with these studies, our study was able to establish that a higher presence of ethnic groups is associated with a higher diversity of maize races and uses. Despite the fact the sample size used for the calculation of this result is considered statistically small, according to [47], even in small samples ($n < 25$), the Pearson correlation coefficient allows us to know if there is relationship between the variables and what is the direction of this relationship. However, the estimate about how strong this relationship is may be biased. In light of these results, the development of future studies is suggested, to further confirm this relationship.

In this regard, the authors of [46] found that the presence of ethnic groups conditions the spatial distribution of maize races, since they are in charge of conserving, adapting, and cultivating local races for specific purposes. The authors of [11,20,48] also described a strong correlation between ethnic groups and maize diversity. However, compared to previous studies, ours describes the variety of uses given to maize grain and plant.

The whole maize plant is used in Mexico, from the grain in the preparation of foods and snacks, to the leaves, stalk, and roots as fodder, fuel, and organic fertilizer [10]. However, for Mexican people there is a basic process for the diet, nixtamalización, which gives rise to the maize dough that is used to prepare tortillas, atoles, and tamales wrapped in totomoxtle, which is the leaf that covers the cob [49].

In our study, specific uses of maize per race and ethnic group were established. Although the highest values of the index of uses were obtained in the environmental units of the center to the south of the country, environmental units were differentiated such as Sierra Tarahumara and Yucatan Peninsula where there are specific races linked ancestrally to the development of ethnic groups that are found there.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

For example, the Apachito race, linked to the development of the Tarahumara ethnic group in the sierras of Chihuahua [19], is used to make tejuino, an alcoholic beverage characteristic of the north of Mexico that substitutes pulque, which is made out of maguey (*Agave salmiana*) in the center-south of the country [50]. The races Dzit Bacal and Nal-tel, which are the base of the diet of Maya people in the Yucatan Peninsula [10], are used to prepare pozol, which is a refreshing beverage that mixes cacao (*Theobroma cacao* L.) with maize [51].

5. Conclusions

The use of GIS tools for the territorial delimitation of genetic richness and intraspecific diversity regions of maize, and their association with ethnic groups and the uses of maize, allowed differentiating seven environmental units, in each of which the maize races with greatest presence were identified. The 64 maize races cultivated in Mexico were grouped exclusively into each of the seven environmental units: North Pacific (7 principal races), Sierra Tarahumara (5), Northeast (2), Center (23), South Pacific (14), Southeast (11), and Yucatan Peninsula (2). The greatest diversity of maize uses and races was found from the center to the south of the country, with a strong association with the ethnic groups in each of the regions. These results can help in decision making for the in situ conservation of maize races in Mexico, when identifying territories with unique characteristics linked to maize races and specific ethnic groups with traditional know-how and, therefore, ensuring food security and promoting an increase of the added value from maize by-products based on specific maize races conserved by local ethnic groups.

Supplementary Materials: The following are available online at https://www.mdpi.com/article/10.3390/agronomy11040672/s1, Figure S1: Delimitation of richness regions for races with more than 30 collections. Example: Cristalino de Chihuahua race. (a) Geographic distribution of collections. (b) Genetic richness region obtained through DivaGis. (c) Genetic richness region that considers the four class intervals with highest concentration of collections (31 to 59, 60 to 89, 90 to 118, and 119 to 148). Figure S2: Spatial delimitation of the buffer zones for each collection of the races with fewer than 30 records. (a) Geographic distribution of the collections of races with fewer than 30 records. (b) Spatial representation of a buffer zone of 5-km radius. (c) Spatial representation of the buffer zones of 5-km radius for each collection of races with less fewer 30 records. Figure S3: Spatial representation of the teosinte collections with the genetic richness regions of the 49 races with more than 30 collections and buffer zones of 5-km radius for the collections of the 15 races with fewer than 30 records. Figure S4: Spatial delimitation of specific richness indexes (A: Margalef and Menhinick) and structure indexes (B: Shannon, Brillouin, and Simpson) for the geographic distribution of the 64 maize races cultivated in Mexico. Figure S5. Spatial delimitation of the centers of origin and domestication of maize estab-lished by Kato in the book Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica [38]. Figure S6: Spatial distribution of environmental units and ethnic groups in Mexico. Table S1: Description of the principal uses of the grain and the plant of 64 native maize races cultivated in Mexico. Table S2: Relationship of the principal maize races cultivated in each environmental unit with specific uses of grain and plant and the ethnic groups associated territorially to the geographic distribution of maize races.

Author Contributions: Conceptualization, information analysis, and writing of original draft, A.S.-F.; data review and monitoring results, Y.S.-M.; information analysis and writing of final manuscript, J.R.V.-L.; writing, revising, and editing of the final manuscript, J.B.-O.; writing, revising, and editing of the final manuscript, S.P.-L. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Availability of data. The data are available with the first author, at reasonable request.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Acknowledgments: This study is part of the doctoral thesis of the first author, in the International Doctorate Program of Agricultural and Environmental Sciences of the Universidad de Santiago de Compostela, Spain, and to Project number 364. Sustainable productive reconversion for the development of rural producers in Campeche was assigned to the first author by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia (CONACyT). To the anonymous reviewers of the article, for their comments, which helped to enrich the research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Ruíz-Corral, J.A.; Durán-Puga, N.; Sánchez-González, J.J.; Rón-Parra, J.; González-Eguiarte, D.R.; Holland, J.B.; Medina-García, G. Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 Mexican maize races. *Crop Sci.* **2008**, *48*, 1502–1512. [CrossRef]
2. Dyer, G.A.; Taylor, J.E. A crop population perspective on maize seed systems in Mexico. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2008**, *105*, 470–475. [CrossRef]
3. Ureta, C.; González-Salazar, C.; González, E.J.; Álvarez-Buylla, E.R.; Martínez-Meyer, E. Environmental and social factors account for Mexican maize richness and distribution: A data mining approach. *Agr. Ecosyst. Environ.* **2013**, *179*, 25–34. [CrossRef]
4. CONABIO. Base de Datos del Proyecto Global "Recopilación, Generación, Actualización y Análisis de Información Acerca de la Diversidad Genética de Maíces y sus Parientes Silvestres en México". Available online: https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/proyectoMaices (accessed on 3 September 2019).
5. Matsuoka, Y.; Vigouroux, Y.; Goodman, M.M.; Sanchez, J.; Buckler, E.; Doebley, J. A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2002**, *99*, 6080–6084. [CrossRef] [PubMed]
6. Kato, Y.T.A. Cómo y dónde se originó el maíz. *Investig. Cienc.* **2005**, *347*, 68–72.
7. Caballero-García, M.A.; Córdova-Téllez, L.; López-Herrera, A.D.J. Validación empírica de la teoría multicéntrica del origen y diversidad del maíz en México. *Rev. Fitotec. Mex.* **2019**, *42*, 357–366. [CrossRef]
8. Piperno, D.R.; Ranere, A.J.; Holst, I.; Iriarte, J.; Dickau, R. Starch grain and phytolith evidence for early ninth millennium B.P. maize from the Central Balsas River Valley, Mexico. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2009**, *106*, 5019–5024. [CrossRef] [PubMed]
9. Hufford, M.B.; Martínez-Meyer, E.; Gaut, B.S.; Eguiarte, L.E.; Tenaillon, M.I. Inferences from the historical distribution of wild and domesticated maize provide ecological and evolutionary insight. *PLoS ONE* **2012**, *7*, e47659. [CrossRef]
10. Fernández-Suárez, R.; Morales-Chávez, L.A.; Gálvez-Mariscal, A. Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional: Una revisión indispensable. *Revi. Fitotec. Mex.* **2013**, *36*, 275–283. [CrossRef]
11. Perales, H.R.; Benz, B.F.; Brush, S.B. Maize diversity and ethnolinguistic diversity in Chiapas, Mexico. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2005**, *102*, 949–954. [CrossRef]
12. Brush, S.B. In situ conservation of landraces in centers of crop diversity. *Crop Sci.* **1995**, *35*, 346–354. [CrossRef]
13. Thrupp, L.A. Linking agricultural biodiversity and food security: The valuable role of agrobiodiversity for sustainable agriculture. *Int. Aff.* **2000**, *76*, 283–297. [CrossRef]
14. Esquinas-Alcazar, J. Protecting crop genetic diversity for food security: Political, ethical and technical challenges. *Nat. Rev. Genet.* **2005**, *6*, 946–953. [CrossRef] [PubMed]
15. Guzzon, F.; Arandia-Rios, L.W.; Caviedes-Cepeda, G.M.; Céspedes-Polo, M.; Chavez-Cabrera, A.; Muriel-Figueroa, J.; Medina-Hoyos, A.E.; Jara-Calvo, T.W.; Molnar, T.L.; Narro-León, L.A.; et al. Conservation and use of Latin American maize diversity: Pillar of nutrition security and cultural heritage of humanity. *Agronomy* **2021**, *11*, 172. [CrossRef]
16. Van Etten, J.; López, M.R.F.; Monterroso, L.G.M.; Samayoa, K.M.P. Genetic diversity of maize (*Zea mays* L. ssp. *Mays*) in communities of the western highlands of Guatemala: Geographical patterns and processes. *Genet. Resour. Crop Evol.* **2008**, *55*, 303–317. [CrossRef]
17. Fenzi, M.; Jarvis, D.I.; Reyes, L.M.A.; Moreno, L.L.; Tuxill, J. Longitudinal analysis of maize diversity in Yucatan, Mexico: Influence of agro-ecological factors on landraces conservation and modern variety introduction. *Plant. Genet. Resour. Characterisation Util.* **2017**, *15*, 51–63. [CrossRef]
18. Perales, H.; Golicher, D. Mapping the diversity of maize races in Mexico. *PLoS ONE* **2014**, *9*, e114657. [CrossRef] [PubMed]
19. Orozco-Ramírez, Q.; Perales, H.; Hijmans, R.J. Geographical distribution and diversity of maize (*Zea mays* L. subsp. *mays*) races in Mexico. *Genet. Resour. Crop Evol.* **2017**, *64*, 855–865. [CrossRef]
20. Orozco-Ramírez, Q.; Ross-Ibarra, J.; Santacruz-Varela, A.; Brush, S. Maize diversity associated with social origin and environmental variation in Southern Mexico. *Heredity* **2016**, *116*, 477–484. [CrossRef]
21. Bellon, M.R.; Hodson, D.; Hellin, J. Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2011**, *108*, 13432–13437. [CrossRef]
22. Mercer, K.L.; Perales, H.R.; Wainwright, J.D. Climate change and the transgenic adaptation strategy: Smallholder livelihoods, climate justice, and maize landraces in Mexico. *Glob. Environ. Change* **2012**, *22*, 495–504. [CrossRef]
23. Serratos-Hernández, J.A.; Islas-Gutiérrez, F.; Buendía-Rodríguez, E.; Berthaud, J. Gene flow scenarios with transgenic maize in Mexico. *Environ. Biosaf. Res.* **2004**, *3*, 149–157. [CrossRef] [PubMed]
24. Schröder, W.; Schmidt, G. Overview of principles and implementations to deal with spatial issues in monitoring environmental effects of genetically modified organisms. *Environ. Sci. Eur.* **2012**, *24*, 6. [CrossRef]

25. Lazos-Chavero, E. Consideraciones socioeconómicas y culturales en la controvertida introducción del maíz transgénico: El caso de Tlaxcala. *Sociológica* **2014**, *29*, 201–240.
26. Dyer, G.A.; López-Feldman, A.; Yúnez-Naude, A.; Taylor, J.E. Genetic erosion in maize's center of origin. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2014**, *111*, 14094–14099. [CrossRef]
27. Hijmans, R.J.; Schreuder, M.J.C.; de la Cruz, J.; Guarino, L. Using GIS to check coordinates of genebank accessions. *Genet. Resour. Crop Evol.* **1999**, *46*, 291–296. [CrossRef]
28. Guarino, L.; Jarvis, A.; Hijmans, R.J.; Maxted, N. Geographic Information Systems (GIS) and the Conservation and Use of Plant Genetic Resources. In *Managing Plant Genetic Diversity*; Engels, J.M.M., Ramanatha, R.V.B., Jackson, M.T., Eds.; CABI Publishing: Wallingford, UK, 2002; pp. 387–404.
29. Hijmans, R.J.; Garrett, K.A.; Huaman, Z.; Zhang, D.P.; Schreuder, M.; Bonierbale, M. Assessing the geographic representativeness of genebank collections: The case of Bolivian wild potatoes. *Conserv. Biol.* **2000**, *14*, 1755–1765. [CrossRef]
30. Scheldeman, X.; Willemen, L.; d'Eeckenbrugge, G.C.; Romeijn-Peeters, E.; Restrepo, M.T.; Motoche, J.R.; Jiménez, D.; Lobo, M.; Medina, C.I.; Reyes, C.; et al. Distribution, diversity and environmental adaptation of highland papayas (*Vasconcellea* spp.) in tropical and subtropical America. In *Plant Conservation and Biodiversity*; Hawksworth, D.L., Bull, A.T., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2007; Volume 16, pp. 293–310. [CrossRef]
31. Willemen, L.; Scheldeman, X.; Cabellos, V.S.; Salazar, S.R.; Guarino, L. Spatial patterns of diversity and genetic erosion of traditional cassava (*Manihot esculenta* Crantz) in the Peruvian Amazon: An evaluation of socio-economic and environmental indicators. *Genet. Resour. Crop Evol.* **2007**, *54*, 1599–1612. [CrossRef]
32. Sánchez González, J.D.J.; Ruiz Corral, J.A.; García, G.M.; Ojeda, G.R.; Larios, J.B.; Holland, L.D.L.C.; Medrano, R.M.; García Romero, G.E. Ecogeography of Teosinte. *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0192676. [CrossRef]
33. Hijmans, R.J.; Guarino, L.; Cruz, M.; Rojas, E. Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data: 1. DIVA-GIS. *Plant Genet. Resour. Newsl.* **2001**, *127*, 15–19.
34. Viner, B.J.; Arritt, R.W. Increased pollen viability resulting from transport to the upper boundary layer. *Field Crops Res.* **2010**, *119*, 195–200. [CrossRef]
35. Hijmans, R.; Cameron, E.; Parra, L.; Jones, G.; Jarvis, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **2005**, *25*, 1965–1978. [CrossRef]
36. CONABIO. Elementos para la determinación de centros de origen y centros de diversidad genética en general y el caso específico de la liberación experimental de maíz transgénico al medio ambiente en México. *Rev. Geogr. Agrícola* **2006**, *38*, 121–140.
37. Diker, K.; Heermann, D.F.; Bausch, W.C.; Wright, D.K. Shannon-Wiener's diversity index for linking yield monitor and remotely sensed data for corn. *Trans. ASABE* **2004**, *47*, 1347–1354. [CrossRef]
38. Kato, T.A.; Mapes, C.; Mera, L.M.; Serratos, J.A.; Bye, R.A. *Origen y Diversificación del Maíz: Una Revisión Analítica*; Universidad Nacional Autónoma de México: Mexico City, Mexico, 2009; p. 116.
39. CONABIO. Portal de Geoinformación 2020: Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB). Available online: http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/ (accessed on 25 January 2020).
40. Anguix, A.; Díaz, L. GvSIG: A GIS desktop solution for an open SDI. *J. Geogr. Reg. Plann.* **2008**, *1*, 041–048.
41. Gómez-Orea, D. *Ordenación del Territorio. Una Aproximación desde el Medio Físico*; Agrícola Española: Madrid, Spain, 1994; p. 238.
42. National Commission for the Development of Indigenous Peoples. Territorios de Pueblos Indígenas. Available online: http://132.248.14.102/layers/CapaBase:ii_4_3_terri_indigena (accessed on 14 November 2020).
43. Team, R. The R Project for Statistical Computing. Available online: https://www.r-project.org/ (accessed on 4 December 2020).
44. Graham, C.H.; Hijmans, R.J. A comparison of methods for mapping species ranges and species richness. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2006**, *15*, 578–587. [CrossRef]
45. Aragón-Cuevas, F.; Taba, S.; Hernández-Casillas, J.; Figueroa, C.J.; Serrano, A.B.; Castro-García, F. *Catálogo de Maíces Criollos de Oaxaca*; INIFAP-SAGARPA: Oaxaca, Mexico, 2006; p. 343.
46. Ureta, C.; Martínez-Meyer, E.; Perales, H.R.; Álvarez-Buylla, E.R. Projecting the effects of climate change on the distribution of maize races and their wild relatives in Mexico. *Glob. Chang. Biol.* **2012**, *18*, 1073–1082. [CrossRef]
47. Bonett, D.G.; Wright, T.A. Sample size requirements for estimating Pearson, Kendall and Spearman correlations. *Psychometrika* **2000**, *65*, 23–28. [CrossRef]
48. Brush, S.B.; Perales, H.R. A maize landscape: Ethnicity and agrobiodiversity in Chiapas Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2007**, *121*, 211–221. [CrossRef]
49. Masas, O.; Flour, N.C. Propiedades químicas, fisicoquímicas y reológicas de masas y harinas de maíz nixtamalizado. *Agrociencia* **2002**, *36*, 319–328.
50. Godoy, A.; Herrera, T.; Ulloa, M. *Más Allá del Pulque y el Tepache. Las Bebidas Alcohólicas no Destiladas Indígenas de México*; Universidad Nacional Autonoma de México: Mexico City, Mexico, 2003; p. 112.
51. Olivares-Illana, V.; Wacher-Rodarte, C.; Le-Borgne, S.; López-Munguía, A. Characterization of a cell-associated inulosucrase from a novel source: A Leuconostoc citreum strain isolated from Pozol, a fermented corn beverage of Mayan origin. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* **2002**, *28*, 112–117. [CrossRef] [PubMed]

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

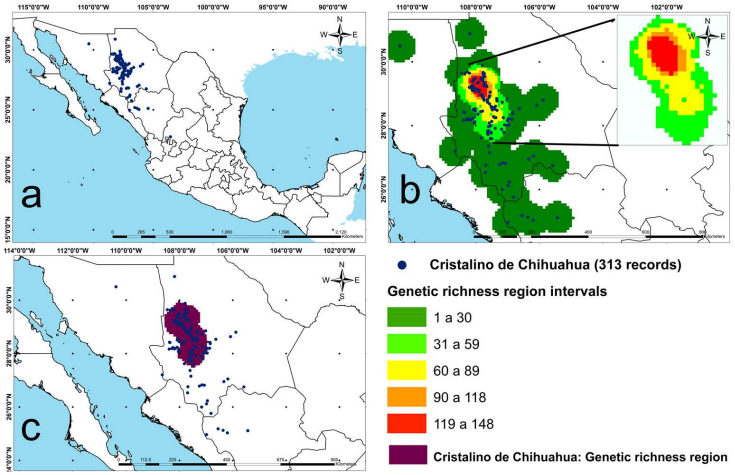


Figure S1. Delimitation of richness regions for races with more than 30 collections. Example: Cristalino de Chihuahua race. a) Geographic distribution of collections. b) Genetic richness region obtained through DivaGis. c) Genetic richness region that considers the four class intervals with highest concentration of collections (31 to 59, 60 to 89, 90 to 118 and 119 to 148).

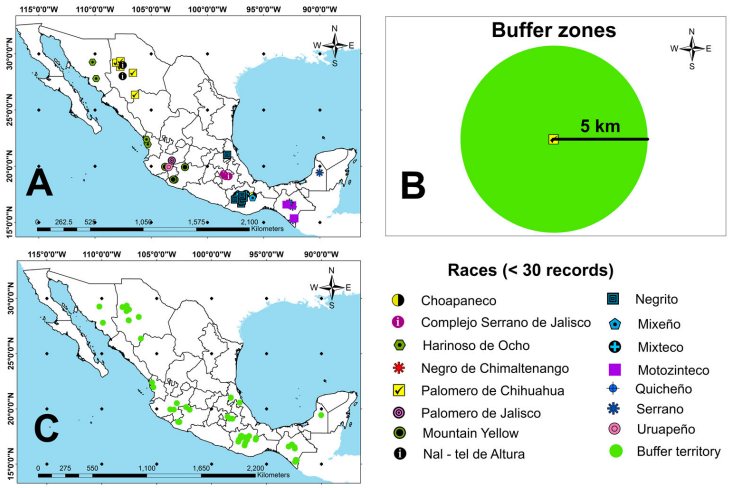


Figure S2. Spatial delimitation of the buffer zones for each collection of the races with less than 30 records. a) Geographic distribution of the collections of races with less than 30 records. b) Spatial representation of a buffer zone of 5 km radius. C) Spatial representation of the buffer zones of 5 km radius for each collection of races with less than 30 records.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

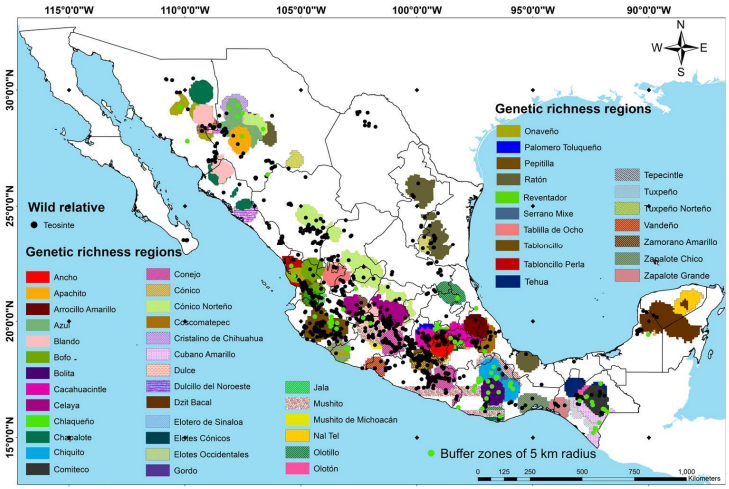


Figure S3. Spatial representation of the teosinte collections with the genetic richness regions of the 49 races with more than 30 collections and buffer zones of 5 km radius for the collections of the 15 races with less than 30 records.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

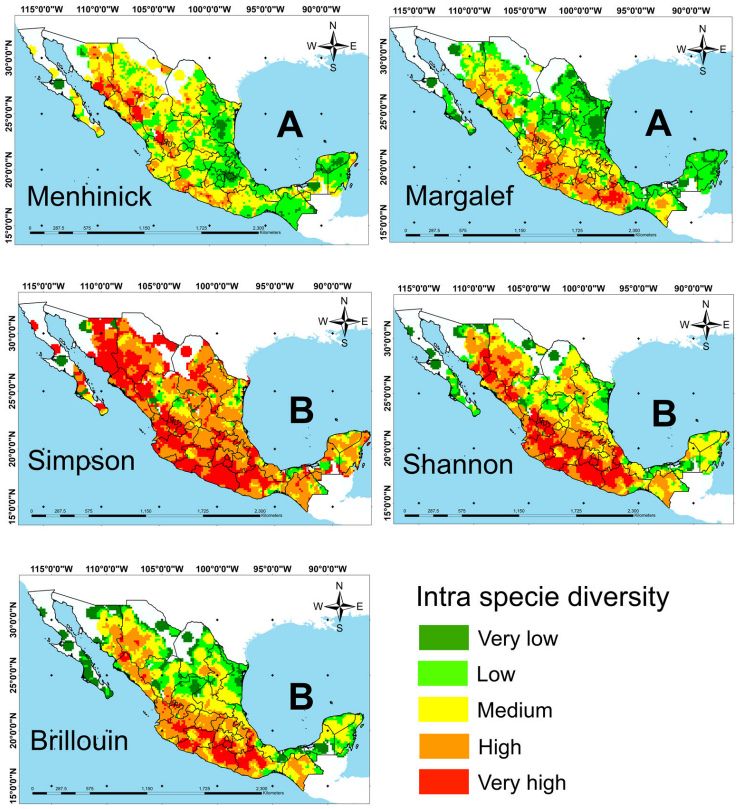


Figure S4. Spatial delimitation of specific richness indexes (A: Margalef and Menhinick) and structure indexes (B: Shannon, Brillouin and Simpson) for the geographic distribution of the 64 maize races cultivated in Mexico.

USC
UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

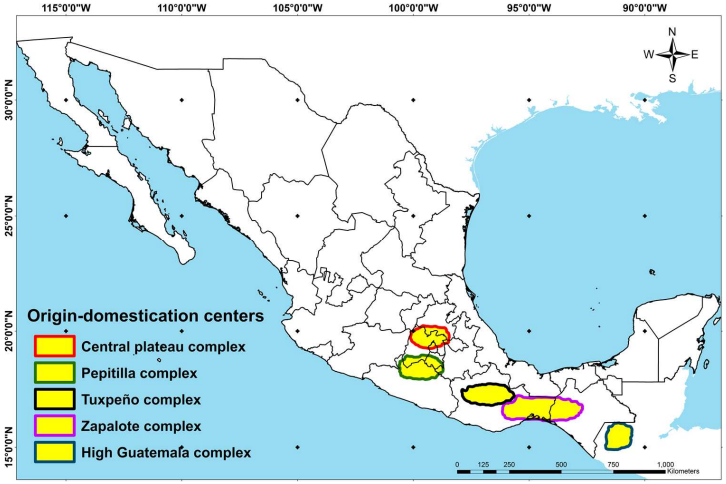


Figure S5. Spatial delimitation of the centers of origin and domestication of maize established by Kato in the book Origen y diversificación del maíz: una revisión analítica [38].

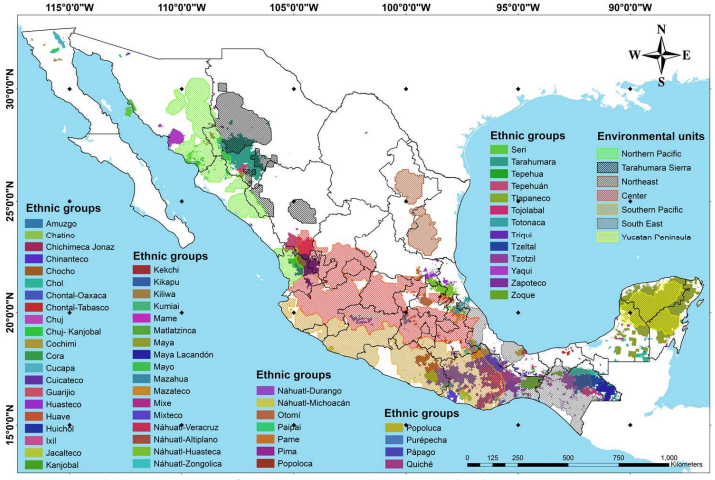


Figure S6. Spatial distribution of environmental units and ethnic groups in Mexico.

Table S1. Description of the principal grain and plant uses of the 64 native maize races cultivated in Mexico.

Uses	Description
Elote (A)	Tender ear of maize that is boiled and prepared warm with cheese, mayonnaise, lime and piquín chili pepper.
Esquite (B)	Grains from the ear fried in oil or boiled with árbol chili pepper, epazote and onion. They are served with salt, lime, piquín chili pepper, mayonnaise and cheese.
Nixtamal (C)	Process by which maize is cooked with water and live lime, then ground and used to make the nixtamal dough that is used for the preparation of different dishes.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Pozole (D)	It is a broth made from maize grains, to which chicken or pork meat is added as secondary ingredient.
Pozol (E)	Thick beverage based on cacao and maize that is consumed primarily in southern Mexico.
Tamal (F)	Food made from nixtamal dough filled with meats, vegetables, chili peppers, fruits, sauces and other ingredients. They are wrapped in plant leaves and cooked in water or vapor.
Tortilla (G)	Flat and circular food made from nixtamal dough that is cooked over low heat and eaten alone or filled with various ingredients.
Atole (H)	Sweet maize beverage in water that is cooked with moderate viscosity and served as hot as possible.
Pinole (I)	Toasted maize flour that is sweetened to be consumed as candy or else to prepare cold and hot beverages.
Tejuino (J)	Fermented maize beverage that is consumed mainly in northern Mexico.
Confectionery (K)	Elaboration of cookies, home-made bread and cakes based on sweet maize grains.
Fodder (L)	The maize plant serves as feed, mainly for ruminant animals, whether once the plant has dried or by chopping it and making ensilage with green plants. It is common for the maize grain to also be used as fodder.
Fuel (M)	In some rural regions in Mexico, the dry maize plant is a substitute for natural gas or tree firewood as fuel to generate fire that is used in food cooking.
Totomoxtle (N)	Dry, coarse and brittle leaves that wrap the ear of maize. Due to their resistance, they are used to wrap tamales.
Fertilizer (O)	The residues that remain on the maize plant once the grain and the plant are harvested are incorporated to the soil as organic matter.

Prepared by authors based on what was reported in [4,10]. A to K correspond to uses of the maize grain. L to O correspond to uses of the maize plant.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

Table S2. Relationship of the principal maize races cultivated in each environmental unit with specific uses of grain and plant, and the ethnic groups associated territorially to the geographic distribution of maize races.

Environmental units	Principal maize races (% Records)		Uses*														Secondary maize races (% Records)		Ethnic groups
			Grain										Plant						
	Name	%	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	Name	%	
North Pacific	Harinoso de Ocho	100.00	1		1	1								1	1			Bofo	18.92	Cora
	Chapalote	74.19	1	1							1		1	1				Tabloncillo	16.11	Guarijio
	Blando	70.45	1		1					1	1	1		1				Elotero de Sinaloa	14.29	Huichol
	Dulcillo del Noroeste	70.27	1	1							1			1						Mayo
	Onaveño	56.25	1		1			1	1	1	1			1	1	1				Pima
	Tabloncillo Perla	48.98	1		1	1			1	1				1	1	1				Tarahumara
	Reventador	43.33	1	1	1	1					1			1	1	1				Tepehuán
Tarahumara	Azul	93.94	1		1	1		1	1	1	1	1		1	1	1		Cónico Norteño	25.08	Pima
Sierras	Cristalino de Chihuahua	92.01	1		1	1		1	1	1	1	1		1		1		Tablilla de Ocho	22.73	Tarahumara
	Palomero de Chihuahua	83.33			1									1				Dulcillo del Noroeste	10.81	Tepehuán
	Gordo	81.16	1		1			1	1	1	1	1		1		1		Ratón	10.28	
	Apachito	75.38			1							1		1						
Northeast	Tuxpeño Norteño	25.69	1		1				1	1				1	1	1		Tuxpeño	4.81	Ninguna
	Ratón	21.20	1		1			1	1	1	1			1	1	1				
Center	Complejo Serrano de Jalisco	100.00			1									1		1		Pepitilla	30.67	Chocho
	Palomero de Jalisco	100.00			1					1				1				Elotero de Sinaloa	15.58	Cora
	Uruapeño	100.00			1									1				Vandeño	11.39	Huichol
	Mushito de Michoacán	92.59	1						1					1				Blando	11.36	Matlatzinca
	Cacahuacintle	86.76	1		1	1		1	1	1	1			1		1				Mazahua
	Arrocillo Amarillo	85.76	1		1			1	1	1				1		1				Mazateco

	Chalqueño	85.26	1		1	1		1	1	1				1	1	1			Mixteco
	Zamorano Amarillo	85.19							1					1					Náhuatl-Altiplano
	Jala	81.40	1			1			1		1		1			1	1		Náhuatl-Veracruz
	Elotes Cónicos	79.72	1		1	1		1	1	1				1	1	1			Náhuatl-Zongolica
	Cónico	79.50	1		1			1	1	1	1			1	1	1	1		Otomí
	Palomero Toluqueño	79.25			1			1	1	1				1					Pame
	Coscomatepec	78.15	1		1			1	1	1				1		1			Popoloca
	Dulce	76.19	1							1	1		1	1					Purépecha
	Ancho	72.84	1		1	1		1	1					1	1	1			Tepehua
	Bofo	67.57	1		1	1			1	1	1	1		1					Tepehuán
	Celaya	66.35	1		1	1		1	1	1				1	1	1			Totonaca
	Tablilla de Ocho	59.09	1		1				1	1	1			1					Zapoteca
	Mushito	57.59	1		1	1		1	1	1				1	1	1	1		
	Elotes Occidentales	56.58	1		1	1		1	1	1	1	1		1	1	1			
	Mountain Yellow	50.00	1		1									1					
	Cónico Norteño	43.18	1		1	1		1	1	1	1	1		1	1	1			
	Tabloncillo	40.22	1	1	1	1		1	1	1	1	1		1	1	1	1		
South Pacific	Choapaneco	100.00			1									1				Reventador	38.89	Amuzgo
	Mixteco	100.00			1				1					1				Mushito	38.22	Chatino
	Serrano	100.00						1	1	1				1	1	1		Elotes Occidentales	36.08	Chinanteco
	Serrano Mixe	96.77			1				1					1	1			Mountain Yellow	37.50	Chocho
	Chiquito	88.37						1	1	1				1	1			Zapalote Grande	29.76	Chontal-Oaxaca
	Bolita	80.11	1		1	1		1	1	1	1			1	1	1		Ancho	23.77	Cuicateco
	Mixeño	75.00			1				1					1				Onaveño	21.88	Mazateco
	Negrito	75.00			1				1						1			Nal-tel	20.27	Mixe
	Conejo	73.11	1		1			1	1	1				1	1	1	1	Olotillo	20.24	Mixteco
	Pepitilla	65.50	1		1			1	1	1	1	1		1	1	1		Tabloncillo	17.59	Náhuatl-Michoacán
	Nal-tel de Altura	52.63	1		1		1	1	1	1				1				Olotón	16.64	Náhuatl-Altiplano

	Elotero de Sinaloa	51.95	1	1	1	1			1	1	1		1	1	1		Tabloncillo Perla	13.78	Náhuatl-Zongolica
	Vandeño	50.32	1		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	Elotes Cónicos	11.54	Popoloca
	Tepecintle	49.43	1		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	Celaya	10.86	Purépecha
																			Tlapaneco
																			Triqui
																			Zapoteco
South East	Motozinteco	100.00			1				1				1				Nal-tel de Altura	36.84	Chinanteco
	Quicheño	100.00			1								1				Tepecintle	35.98	Chol
	Comiteco	95.31	1		1		1	1	1	1			1	1	1	1	Vandeño	20.25	Chontal-Oaxaca
	Tehua	91.11	1		1		1	1	1				1	1			Coscomatepec	19.33	Chontal-Tabasco
	Cubano Amarillo	90.77					1		1				1				Mountain Yellow	12.50	Chuj
	Zapalote Chico	82.86	1		1	1	1	1	1	1			1	1			Ratón	10.28	Cuicateco
	Olotón	80.10	1		1	1	1	1	1	1			1	1	1				Huave
	Zapalote Grande	55.95	1		1	1		1	1	1			1	1	1	1			Jacalteco
	Negro de Chimaltenango	50.00			1				1				1						Kanjobal
	Olotillo	41.86	1		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1			Mame
	Tuxpeño	41.60	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1			Mazateco
																			Mixe
																			Mixteco
																			Náhuatl-Huasteca
																			Náhuatl-Zongolica
																			Popoloca
																			Popoluca
																			Quiché
																			Tojolabal
																			Totonaca
																			Tzeltal
																			Tzotzil

													Zapoteco
													Zoque
Yucatan Peninsula	Dzit Bacal	62.07	1	1	1	1	1	1	1	1		Tuxpeño	11.38	Chol
	Nal-tel	45.95	1	1	1	1	1	1	1	1	1			Mame
														Maya
														Quiché
														Tzotzil

*A: Elote, B: Esquite, C: Nixtamal, D: Pozole, E: Pozol, F: Tamal, G: Tortilla, H: Atole, I: Pinole, J: Tejuino, K: Confectionery, L: Fodder, M: Fuel, N: Totomoxtle, O: Fertilizer