

Evidencia 2	Tesis de Maestría ya graduada sobre la Red de intercambio de semillas en las comunidades del proyecto Mano Vuelta
Objetivo de científico O.C. 1.2.	Análisis de redes de semillas y su relación con la distancia al mercado y alimentación.
Meta MC1.2.1	Una caracterización formal de las redes de semillas al interior y entre las comunidades.

¿Qué?

Realizar un análisis de redes de semillas al interior y entre las comunidades del proyecto Mano Vuelta y su relación con la distancia al mercado y alimentación.

¿Quiénes?

305 productores entrevistados y formando la red regional de semillas.

¿Cuándo?

Entre agosto de 2021 y abril del 2022 (incluyendo el trabajo durante la fase semilla y la etapa 1 del proyecto).

¿Dónde?

En los municipios de Xico y Ayahualulco del Cofre de Perote



Por medio de la presente se hace constar que la C.

SOFÍA LAIL LUGO CASTILLA

Presentó su examen para obtener el grado de **Maestra en Ciencias** el día 12 de diciembre de 2022, defendiendo el trabajo titulado: "Factores que moldean las redes de semillas: implicaciones para la conservación del maíz en la región del Cofre de Perote, Veracruz", bajo la Dirección de la Doctora Simoneta Negrete Yankelevich. El examen fue aprobado satisfactoriamente y su documentación oficial se encuentra en proceso de elaboración y de recabar firmas autógrafas.

El examen de grado fue precedido por los integrantes de su Jurado de tesis:

Dra. Rosa María González Amaro
Dra. Simoneta Negrete Yankelevich
Dr. Hugo Rafael Perales Rivera

Presidenta
Secretaria
Vocal

A quienes agradezco su valiosa disposición y calidad académica con que contribuyeron de manera muy importante a la formación académica de la M. en C. Lugo Castilla.

Para los fines que a la interesada convengan se extiende la presente constancia a partir de hoy, doce de diciembre del año dos mil veintidós. Cabe mencionar que este documento no es evidencia de haber cumplido con todos los requisitos administrativos para llevar a cabo la entrega de los documentos de grado.

Xalapa Enríquez, Veracruz a 12 de diciembre de 2022.

Dr. Oscar Luis Briones Villarreal
Secretario de Posgrado



FACTORES QUE MOLDEAN LAS REDES DE SEMILLAS: IMPLICACIONES PARA LA CONSERVACIÓN DEL MAÍZ EN LA REGIÓN DEL COFRE DE PEROTE, VERACRUZ

TESIS QUE PRESENTA **SOFÍA LAIL LUGO CASTILLA**
PARA OBTENER EL TÍTULO DE **MAESTRA EN CIENCIAS**

Xalapa, Veracruz, México 2022



Aprobación final del documento de tesis de grado:

"Factores que moldean las redes de semillas: implicaciones para la conservación del maíz en la región del Cofre de Perote, Veracruz"

	Nombre	Firma
Directora	Dra. Simoneta Negrete Yankelevich	
Comité tutorial	Dra. Luciana Porter Bolland	
	Dra. Mariana Benítez Keinrad	Voto aprobatorio otorgado por: Dra. Mariana Benítez Keinrad al trabajo de tesis titulado: Factores que moldean las redes de semillas: implicaciones para la conservación del maíz en la región del Cofre de Perote, Veracruz. Nombre del estudiante: Sofia Lail Lugo Castilla. Sello digital del voto aprobatorio: <<É]Ex+IA[Ookr6nbU9D06ejLUViPmCY+I-(tv,δAÓzSufVlHtkx+k-vx+UGlx7kf1-vvixTlud1IA,fxeU,x8lvL,kóxvxfxÁ,L,fxL,xf,8-vvkftx-8lv-dkd-ló,fxkÁkovvordlóf,ÁDkd-ZóxL,vx8ktWx,óxvkoÁ,G-ZóxL,vx7lHA,xL,x9,Ál1,fxz,ÁkdÁUVWx ÁkmoikÁ-kókos,ót1,Wxj,-δÁkLx:FPUx ,dxopx,fn,horuM,MMzXUcqsZ:)KaM.431JÁBliÑIQ NüwMIG?TgfpA7d28yhR5>> Fecha y hora de emisión del voto: Thu Dec 1 00:40:34 2022. Usted puede verificar la validez del sello digital en https://firmaselectronicas-posgradonecol.shinyapps.io/VERIFIC/

Jurado

Dra. Rosa María González Amaro



Dr. Hugo Rafael Perales Rivera

Voto aprobatorio otorgado por: Dr. Hugo Rafael Perales Rivera al trabajo de tesis titulado: Factores que moldean las redes de semillas: implicaciones para la conservación del maíz en la región del Cofre de Perote, Veracruz. Nombre del estudiante: Sofia Lail Lugo Castilla.

Sello digital del voto aprobatorio:

<<sLr1?x.FlaOdThu)4LymX;diKNfVZ-cp006.zkU
UEWjpDYEW(E_LHW(erpWE)sLHHEW0E4spjy)WvdyW.phUyEAWH
EjWjyüy)WüWjy.LHHEJWZ.3H4E4LpAy)W3E]EWHÉW4pAy)7E
4LJAWüyHW.EYAWyAWHÉWjyLJAWüyHWpDjyWüyWjy]psyUWwy]
E4]6MWCjWFWÉrpWEDÉyHWjy]ÉHy)WZ.7y]EWzpAW9p7WgxWg1J
[bJ]bWg1ggü3GJR2wCSA[QÜ6oAgtPbqV8eMn9D7Hñ6.OIYB5E]+
>>

Fecha y hora de emisión del voto: Mon Nov 28 20:13:13

2022. Usted puede verificar la validez del sello digital

en <https://firmaselectronicas-posgradoinecol.shinyapps.io/VERIFIC/>

Dr. Tlacaélel Aarón Rivera Núñez



Dra. Ana Laura Wegier Briuolo

Voto aprobatorio otorgado por: Dra. Ana Laura Wegier Briuolo al trabajo de tesis titulado: Factores que moldean las redes de semillas: implicaciones para la conservación del maíz en la región del Cofre de Perote, Veracruz. Nombre del estudiante: Sofia Lail Lugo Castilla.

Sello digital del voto aprobatorio: <<13D55/V5quLig.F-

67sü.ÖkNvB8yoiWETÉU[P_LH+twXÖiÜBRsARü3SÁÉdiSER.VÜ33R
S6RFVlq;SiÉqSi3AqRhS3R:ScqAq:SAqS:qlü33R:eSüly3üFRFüthq;
SyRcRS3RSFih:qc-

RFÜshSAq3SiRBiSghS3RSqöü6hSAq3SEIÜccSAqSZqcfVq.SÜqcR
FcEiS]cRISxhRSARÉcRS4qöüqcS9cúÉI3IS1ÉqS_LJ-

StwSt[e(aet(Statt0Grñ.KZnzYm64jAeO)zliÜ9ApÜdix(CchQobM.ä)R
J7a>>

Fecha y hora de emisión del voto: Tue Nov 29 23:30:23

2022. Usted puede verificar la validez del sello digital

en <https://firmaselectronicas-posgradoinecol.shinyapps.io/VERIFIC/>

AGRADECIMIENTOS

Agradezco muchísimo a la Dra. Simoneta Negrete, por todo el tiempo invertido en enseñarme, por su guía sincera y acertada y por todo el trabajo que ha hecho desde hace tiempo, que permitió que yo pudiera hacer esta investigación. Gracias por recibirme en este proyecto tan esperanzador. Muchas gracias a la Dra. Mariana Benítez por todas las ideas y el apoyo brindado para llevar a cabo este trabajo, gracias por la amabilidad con la que transmites el conocimiento. Agradezco mucho a la Dra. Luciana Porter por los comentarios que me permitieron siempre seguir pensando en cómo aterrizar el trabajo.

Muchas gracias al Dr. Hugo Perales, a la Dra. Rosa González Amaro, al Dr. Tlacaélel Rivera y a la Dra. Ana Wegier, miembros del jurado evaluador, por sus valiosos comentarios para poder concluir el trabajo.

Muchas gracias al Instituto de Ecología, A.C. por el apoyo brindado para cursar la Maestría en Ciencias y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca (No. 774465) brindada para mis estudios de maestría. Un enorme agradecimiento al proyecto “Biodiversidad en la milpa y su suelo: bases de la seguridad alimentaria de mujeres, adolescentes y niños rurales” (No. Proyecto CONACyT 319067) por el financiamiento otorgado para realizar esta investigación. Un enorme agradecimiento a Salvador González Arroyo (Chava) por su amistad y por todo el apoyo brindado en campo. Muchas gracias a todo el equipo Mano Vuelta porque trabajar en este proyecto me da esperanzas de seguir en esto. Gracias a SENDAS, A.C., y en especial a Fabio, Haniel y Lola por el apoyo para poder hacer el trabajo de campo de esta investigación.

Muchísimas gracias a todas las familias milperas que me recibieron cálidamente en sus comunidades y respondieron amablemente las encuestas para que yo pudiera hacer esta investigación. Pero, sobre todo, muchas gracias por sembrar la milpa y preparar alimentos tan ricos, espero poder seguir trabajando en conjunto mucho tiempo más. Sin ustedes, este trabajo simplemente no sería posible. Muchas gracias a Andrés y a Mary por su amistad y por ser ejemplo de que sí se puede, gracias por permitirme tener alimentos sanos cada semana en mi casa.

Muchas gracias a todos los amigos que conocí en el INECOL, sin ustedes la pandemia hubiera sido muy dura. Gracias Essika, Lau, Ariel, Nilson, Charlie, Karlita, Jire, Isma, Frida, Chuy.

Muchas gracias Alberto por todas las ideas, la compañía, el apoyo, las pláticas, el tiempo y el crecimiento, la maestría fue muy bonita a tu lado.

Muchísimas gracias a mi mamá, a Luguini y a mi abue Bety porque sin ellos nada de esto sería posible, gracias por el gran ejemplo que siempre han sido. Gracias Mary por entrar en mi vida y ser mi amiga.

Hay muchas más personas que hicieron posible este trabajo, muchas gracias a todas las personas que han formado parte de este proceso.

DEDICATORIA

A todas las personas que desde su realidad están sembrando una semilla para construir un mundo en donde quepan muchos mundos. Sigamos intercambiando nuestras semillas para que el mundo continúe siendo diverso y lo sea cada vez más.

DECLARACIÓN

Excepto cuando es explícitamente indicado en el texto, el trabajo de investigación contenido en esta tesis fue efectuado por Sofía Lail Lugo Castilla como estudiante de la carrera de Maestra en Ciencias entre agosto del 2020 y diciembre del 2022, bajo la supervisión de la Dra. Simoneta Negrete Yankelevich.

Las investigaciones reportadas en esta tesis no han sido utilizadas anteriormente para obtener otros grados académicos, ni serán utilizadas para tales fines en el futuro.

Candidata: Sofía Lail Lugo Castilla

Directora de tesis: Dra. Simoneta Negrete
Yankelevich

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN.....	2
La larga historia de domesticación	3
Importancia alimenticia del maíz en México y el mundo	5
La pérdida de la diversidad de los maíces nativos	6
El maíz ante el cambio climático.....	8
La importancia de la conservación <i>in situ</i> y <i>ex situ</i>	9
Las redes de semillas y su importancia para la conservación <i>in situ</i>	11
El análisis de redes sociales como aproximación metodológica.....	13
Objetivos	14
Seed exchange networks for agrobiodiversity conservation: the case of maize in a highland region of Mexico	21
Abstract.....	21
Introduction	21
Method	25
Results.....	31
Discussion.....	40
References	47
DISCUSIÓN	52
Resumen de los resultados	52
Posibilidades de fortalecimiento de las redes	54
Las redes de semillas de maíz: un seguro ante las cambiantes condiciones de la actualidad	56
Conclusión.....	63
Apéndice.....	66

ÍNDICE DE TABLAS DEL ARTÍCULO

Table 1. Characteristics of the study communities.....	28
Table 2. Characteristics of the households in the study communities of the Cofre de Perote.	32
Table 3. Characteristics of community seed exchange networks.....	36
Table 4. Results of ERGM.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS DEL ARTÍCULO

Fig 1. The nine study communities and urban areas with seed markets	26
Fig 2. Configurations used to estimate the parameters of the ERGM	31
Fig 3. Regional seed exchange network	34
Fig 4. Seed exchange networks of native maize.....	35
Fig 5. Proportion of households that purchased commercial seeds	37
Fig 6. Robustness of the seed exchange networks.....	38
Fig 7. Number of morphotypes on the plot explained by degree centrality.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS DE LA DISCUSIÓN

Figura 1. Semillas almacenadas para la siembra del siguiente ciclo.....	56
Figura 2. Semillas de maíz negro y pinto.....	57
Figura 3. Trojas para almacenar el maíz.....	59
Figura 4. Mapa de la red regional de intercambio de semillas de maíz del Cofre de Perote.....	60
Figura 5. Mazorcas seleccionadas por la familia para ser semilla.....	62

RESUMEN

El maíz es el sustento de miles de familias indígenas y campesinas en México, por esto, la manera en la que se abastecen de semillas cada año es muy importante. Normalmente, las familias guardan una parte de su cosecha para la siembra del siguiente ciclo, pero, en algunas ocasiones intercambian semillas con otros hogares (principalmente familiares) y es así como forman las redes de intercambio. Conocer los procesos socioecológicos que las influyen permitirá implementar programas y políticas que aseguren su continuidad, pues no es claro si los cambios recientes en los medios de vida de las familias están afectando la manera en la que dichas redes están funcionando. En este trabajo estudiamos los factores que moldean las redes de semillas de maíz nativo en nueve comunidades de la región de alta montaña del Cofre de Perote. Hicimos el análisis en dos escalas, entre comunidades de la región y entre hogares de cada comunidad. Entre comunidades, analizamos si la estructura de las redes está relacionada con la accesibilidad que tienen a los centros urbanos. Entre hogares, evaluamos si la probabilidad de que un hogar intercambie es influida por sus características sociodemográficas y el tamaño de su parcela, y si, a su vez, la red tiene influencia en la conservación de la riqueza de morfotipos de maíz. Mediante un análisis formal de redes sociales, seguido de modelación estadística lineal, encontramos que las comunidades con mayor acceso a los centros urbanos, tienen redes menos robustas que las comunidades más lejanas. Nuestros resultados sugieren que, el acceso a los mercados (de compra de semilla y venta de elotes) y el cambio en los medios de vida son los principales factores que debilitan la robustez de las redes. Esto implica que hay posibilidad de fortalecer las redes de las comunidades con mayor acceso a los centros urbanos a través de proyectos participativos en los que se destaque su importancia. Entre los hogares, las familias que tienen características que les permiten guardar una parte de la cosecha para tener semillas para el siguiente ciclo, son las que dan semillas con mayor frecuencia a los demás. La falta de semillas alimenticias aptas para sembrar es la principal razón de los intercambios. Las redes funcionan como uno de los factores que inciden en la seguridad alimentaria, porque a través de ellas, los hogares pueden acceder a semillas adaptadas a las condiciones locales a un bajo costo, y así, seguir sembrando. Además, las familias que intercambian con más hogares son las que tienen mayor diversidad de maíces en su parcela. Cuando dan y reciben semillas, los hogares están promoviendo, con el uso, la conservación de la diversidad del maíz. Destacar la importancia de los acervos familiares para la conservación de los maíces en las comunidades ayudaría a que los hogares continúen con sus prácticas de intercambio, y de esta manera, se promovería que la diversidad de maíces se siga manteniendo.

INTRODUCCIÓN

Esta tesis se compone por tres capítulos, el primero es la presente introducción, que pone en contexto la importancia del maíz en México y de su conservación *in situ*. El segundo es un artículo que será enviado a una revista internacional indizada en el cual se pusieron a prueba las hipótesis de que i) la estructura de las redes de semillas tiene una relación con la accesibilidad de las comunidades a los centros urbanos y sus mercados, ii) la probabilidad de que un hogar dé semillas depende de sus características sociodemográficas y del tamaño de su parcela y iii) el número de morfotipos de maíz que produce un hogar incrementa con la frecuencia con la que intercambia con otras familias. El tercero, trata de una discusión general sobre las posibles acciones para el fortalecimiento de las redes de semillas y a través de un artículo de divulgación que se enviará a la revista Eco-lógico, se exponen las implicaciones de los resultados del estudio en relación con las políticas actuales.

Al ser México el centro de origen y diversificación del maíz, es necesario que los procesos que permiten su curso evolutivo continúen. Por lo tanto, la conservación *in situ* implica no sólo la preservación de las variedades aisladas, sino la continuación de las prácticas productivas que año con año dan dirección a la evolución de los maíces y permiten que se adapten a las condiciones socioecológicas cambiantes. Uno de los procesos que permite la conservación *in situ* de la diversidad de los maíces es el intercambio de semillas que hacen los hogares campesinos (que en este texto se definen como las unidades familiares de producción y reproducción, ya que se sostienen mayormente por su propio trabajo para vivir de la tierra. Se utilizan como sinónimos hogares, familias y unidades familiares). Los hogares al dar semillas, se aseguran de que esa variedad seguirá presente en la comunidad aun cuando alguna familia (incluida la propia) pierda las semillas (McGuire & Sperling, 2016). Además, si los hogares intercambian con más hogares, tienen oportunidad de acceder a la mayor parte del germoplasma presente en su comunidad, o en la región, lo cual hace que conserven la diversidad del maíz al reproducirlo (Llamas-Guzmán et al., 2022). El sistema del maíz en México se ha mostrado relativamente resiliente ante la liberalización económica y ante el cambio climático, aunque se reconoce que ha habido una tendencia al abandono de la siembra del maíz (Eakin et al., 2018). Sin embargo, desde la década de 1990, ha incrementado en gran medida la importación del maíz amarillo de los Estados Unidos, que está destinado al consumo pecuario (SIAP, 2022). Además, se han registrado ya casos de erosión genética del cultivo (Leyva-Madrigal et al., 2020; Perales & Golicher, 2014).

Posiblemente, las condiciones cambiantes que están viviendo las familias campesinas están afectando la manera en que intercambian sus semillas, como se ha sugerido en estudios previos (Leyva-Madrigal et al., 2020). En este trabajo nos planteamos el objetivo de explorar esta pregunta.

La larga historia de domesticación

México es centro de origen y diversificación del maíz (*Zea mays ssp mays*) (Piperno, 2018). En la actualidad, hay un debate acerca del origen del maíz y de acuerdo a (Kato-Yamakake, 2009), las siguientes son las teorías que han sido relevantes:

- Teoría tripartita: Postula que el maíz fue domesticado a partir de un maíz palomero tunicado silvestre que se hibridó con el *Tripsacum*, lo cual dio origen al teocintle, y a partir de esto se dio origen a la mayoría de los maíces modernos que existen en América. Sin embargo, se han hecho experimentos de hibridación de maíces con *Tripsacum*, teniendo como resultado híbridos muy estériles que no son similares al teocintle. Además, no se han encontrado híbridos maíz-*Tripsacum* en la naturaleza. Es por esto que esta teoría está cada vez más desacreditada.
- Teoría *Tripsacum-diploperennis*: Sostiene que el maíz es resultado de la hibridación del *Tripsacum* con el *Zea diploperennis*. Una de las principales razones por la que esta teoría no es ampliamente aceptada es que ambas especies son perenes y no existe ningún maíz con esta característica, lo cual la hace poco factible.
- El teocintle como ancestro del maíz: Actualmente es la teoría más aceptada y postula que el teocintle anual mexicano es el único ancestro de los maíces contemporáneos, que fueron originados por el proceso de domesticación. Hay dos corrientes de pensamiento dentro de esta teoría, la del origen unicéntrico del maíz y la del origen multicéntrico. La teoría unicéntrica postula que la domesticación empezó en la cuenca del Río Balsas a partir del teocintle (*Zea mays ssp parviglumis*). La teoría del origen multicéntrico sostiene que el maíz fue originado y domesticado en cinco regiones distintas de Mesoamérica, 1) la Mesa central de México, 2) la región de altura media en los estados de Morelos, México y Guerrero, 3) la región centro-norte de Oaxaca, 4) el territorio entre Oaxaca y Chiapas, y 5) la región de alta de Guatemala.

A través de hallazgos de fitolitos y granos de almidón en la cueva Xihuatoxtla, ubicada en la cuenca del Río Balsas, se ha determinado que hace aproximadamente 8,700 años, en una zona baja con una vegetación de bosque tropical caducifolio, el maíz ya estaba presente (Piperno et al., 2009; van Heerwaarden et al., 2011). En Tabasco (San Andrés), se han encontrado restos de fitolitos que datan de hace alrededor de 6,200 años (Piperno, 2011). La radiación del maíz a través de América se dio a lo largo de los siguientes milenios. Se han encontrado evidencias de que el maíz ya estaba presente en Panamá hace aproximadamente 7,600 años, y se introdujo a la zona andina de Colombia entre 6,000 y 7,000 años antes del presente; su presencia en Uruguay data hace 4,600 años y en Brasil hace aproximadamente 3,800 años (Piperno, 2011).

A través de esta larga historia de evolución bajo domesticación, en México se han generado muy diversos sistemas de cultivo del maíz, como la del agroecosistema milpa, que están en estrecha relación con la amplia diversidad ecológica que caracteriza al país (Esteva & Marielle, 2003). Los tres cultivos característicos de la milpa son el maíz, el frijol y la calabaza, también llamada *Triada mesoamericana* por ser los pueblos de Mesoamérica quienes comienzan esta asociación de cultivos. Sin embargo, dependiendo la región, se incluyen muchos otros cultivos y se aprovechan numerosas plantas silvestres, o quelites, que crecen en asociación (Esteva & Marielle, 2003). En algunas regiones, el número de quelites aprovechados asciende hasta 45 especies (Linares & Bye, 2015). Además, el maíz posee una gran plasticidad fenotípica, que le permite desarrollarse desde los 0 hasta los 3,400 msnm, y es a partir de esta condición que se han generado las 59 razas de maíz nativo que están presentes en la actualidad en México (CONABIO, 2013), cada una de ellas adaptada a las distintas regiones geográficas en las que se distribuye (Orozco-Ramírez et al., 2017). Es así como a través de esta larga historia de domesticación, las familias campesinas han dirigido la evolución tanto del agroecosistema milpa, como del maíz como especie, a tal grado que las semillas de maíz han perdido la capacidad de separarse naturalmente de la mazorca para dispersarse. Cabe destacar que esta relación es bidireccional, pues el maíz ha moldeado el desarrollo de nuestra cultura, de tal forma que han surgido procesos como el de la nixtamalización, que permite que tengamos alimentos con altos valores nutraceuticos, que están disponibles gracias a esta práctica (Serna-Saldívar et al., 2013).

Importancia alimenticia del maíz en México y el mundo

Si bien en las diversas manifestaciones de la milpa hay muchas especies cultivadas y aprovechadas, en México el maíz es el cultivo base de la alimentación de la población rural y urbana (Fernández et al., 2013). A nivel mundial, el maíz también es muy importante, pues aun cuando una buena parte de la producción global está destinada a la ganadería (Wegier et al., 2018), su papel en la alimentación es fundamental, pues en el año 2019, el cultivo representó el 12% de la producción agrícola global, con 1.1 billones de toneladas, siendo el cultivo en grano más producido en el mundo (FAO, 2021). Es decir, tanto en México, que es su centro de origen, como en el mundo, el maíz es primordial para la alimentación. Aunque el maíz es un cultivo fundamental para el país, una parte importante del grano se importa para cubrir las necesidades, principalmente industriales, pero también alimenticias. Estados Unidos es el segundo país en el mundo en exportaciones de maíz (FAO, 2021) y en el ciclo 2020-2021, México fue el segundo comprador de maíz de los Estados Unidos (U.S. Grain Council, 2021), pues todo el maíz importado por México en el año 2021 provino de este país (SIAP, 2021b). En el ciclo 2020-2021, el 74.7% del maíz amarillo que se consumió en México se importó de los Estados Unidos y estuvo destinado en su mayoría al consumo pecuario y a la industria del almidón (SIAP, 2022). Sin embargo, México está cerca de la autosuficiencia en cuanto a la producción del maíz blanco, que está destinado al consumo humano (incluyendo el autoconsumo), pues en este mismo ciclo, la producción nacional aportó el 90.3% de la oferta total del grano (SIAP, 2022).

Fue a partir de la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en el año 1994, que el nivel de dependencia hacia los Estados Unidos aumentó, pues las importaciones del grano han incrementado (Moreno-Sáenz & González-Andrade, 2016). Aun cuando México podría ser autosuficiente en cuanto a maíz para consumo humano (Turrent et al., 2012), la dependencia de importaciones de Estados Unidos se refiere casi totalmente a la producción pecuaria. En este sentido, los pequeños productores tienen un papel muy importante, pues el 85% de los productores de maíz en México son pequeños productores con predios menores a 5 hectáreas (SIAP, 2007), que generalmente producen con fines de autoconsumo, pero que tienen el potencial de alimentar con su trabajo a 54.7 millones de personas (Bellon et al., 2018).

Aunque los pequeños productores tienen este potencial, también ocurre que la cosecha del ciclo agrícola es insuficiente para el consumo de la familia durante todo el año (Rivera-Núñez et

al., 2022), lo cual los coloca en una situación delicada de inseguridad alimentaria. Esto se debe a muchos factores entrelazados, pero se ha identificado como una de las posibles causantes al abandono de la milpa como policultivo, a partir de la llamada revolución verde (Bartra, 2009). En México se inició en la década de 1940, pues fue en el año de 1943 que la fundación Rockefeller creó el Programa en Ciencias Agrícolas, promoviendo la experimentación con semillas híbridas y el uso de las mismas, y en los próximos años, se extendió el uso de fertilizantes, herbicidas y maquinaria (Méndez Rojas, 2017). Este paquete tecnológico inicialmente estaba destinado a la producción en las tierras con riego y bajo monocultivos con manejo intensivo en Sonora, Sinaloa, el Bajío (Guanajuato, Michoacán y Querétaro), y Guerrero, pero, a partir de la década de 1960, algunas de estas prácticas tecnológicas, especialmente el uso de fertilizantes, herbicidas y plaguicidas, se extendieron también a las milpas de temporal y a otras regiones (Aguilar et al., 2003). Hay muchas zonas en las que la transformación del sistema ha traído efectos adversos en la productividad porque, aun cuando en un inicio las cosechas aumentaron, el deterioro de los suelos y la pérdida de la biodiversidad ha causado una merma en la producción a mediano y largo plazo (Aguilar et al., 2003; González et al., 2020). La simplificación de la milpa ha significado un aumento en las deudas para la obtención de insumos y reducciones en las cosechas cuando es imposible obtener los insumos necesarios (Ceccon, 2008). Las regiones en las que esto ha sucedido son principalmente aquellas sembradas por pequeños productores que destinan el maíz para autoconsumo y que no necesariamente están integrados a los mercados de venta del maíz (Negrete-Yankelevich et al., 2013).

La pérdida de la diversidad de los maíces nativos

Además de la revolución verde, la liberalización económica, es decir, la importación de maíces de los Estados Unidos con la firma del TLCAN desde el año 1994, ha tenido efectos adversos en el sector campesino y se ha pronosticado la desaparición de las milpas y de la agricultura de subsistencia. Sin embargo, el sistema del maíz en México se ha mostrado relativamente resiliente ante estas políticas, pues en Chiapas y el Estado de México sólo el $\approx 5\%$ de los productores de maíz han dejado de sembrar, pero en muchas ocasiones, esto ha implicado una afectación fuerte a los medios de vida de las familias campesinas, pues, en estas mismas regiones, alrededor del 30% de los hogares han reducido su área de siembra y tienden a diversificar sus labores hacia trabajos no agrícolas en las ciudades del país o fuera del mismo (Eakin et al., 2014, 2018). Como consecuencia

de la revolución verde y posteriormente de la liberalización económica, la conservación de los maíces nativos ha sido una preocupación desde la década de 1970 hasta el presente, por parte de organismos internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) (Khoury et al., 2022), pero también por parte de la academia y de organizaciones de la sociedad civil que reconocen la importancia del maíz para la alimentación de la población indígena, campesina y urbana (Esteva & Marielle, 2003). Esta preocupación se debe principalmente al desplazamiento de las variedades nativas por las variedades híbridas (McLean-Rodríguez et al., 2019) y a la posible entrada de maíces transgénicos (Esteva & Marielle, 2003). Aun así, el 61.8% de la producción nacional está basada en el uso de semillas nativas o criollas, tanto de maíz como de otros cultivos (INEGI, 2019), y el 75% del maíz que se cultiva en México proviene de semillas guardadas de un ciclo agrícola a otro (Bellon et al., 2018), tanto de variedades nativas como de variedades acriolladas, que son generaciones avanzadas de maíces comerciales, y que generalmente están mezcladas con maíces nativos (Bellon et al., 2006). El resto corresponde a las semillas de maíces comerciales, principalmente híbridas, que son cruza de maíces endógamos, que generalmente tienen una mayor productividad que los progenitores, pero que al ser sembrados en una segunda generación, una gran parte pierde el vigor híbrido, por lo cual las familias campesinas necesitan adquirir nuevamente semillas para alcanzar iguales rendimientos (Berlan & Lewontin, 1986).

La semilla ha sido un punto de interés estratégico para la penetración de la agricultura industrial en la agricultura campesina, pues cumple un doble objetivo, como semilla para el inicio del proceso productivo y como objetivo final para la producción del grano. Por ello, la opción de producir o de consumir está representada en cada grano y es a través del desarrollo de las semillas híbridas, que se ha separado a las familias campesinas del poder de reproducir la agricultura por sus propios medios, y como resultado, las empresas semilleras obtienen grandes ganancias (Kloppenburger, 2004). Es por esto por lo que, con la conservación de las semillas nativas, se protege el derecho de los campesinos de decidir como producir, con la libertad de hacerlo bajo sus propios medios y necesidades.

Existe la arraigada hipótesis de que la pérdida de la diversidad de cultivos nativos se debe a que son reemplazados por los cultivares modernos (Harlan, 1975). En algunas regiones de México, como en el estado de Morelos, en efecto ha habido un decremento en la siembra del maíz

nativo, lo que ha conducido a la pérdida de los maíces nativos en los últimos 50 años, y una de las principales razones de esto es el reemplazo de los maíces nativos por la siembra de maíces comerciales, pues el 44% de las familias que solían sembrar maíces nativos, dejaron de sembrarlos porque prefieren los maíces híbridos por el régimen tecnológico, científico y de mercado que hace más factible la siembra de los híbridos en esta zona (McLean-Rodríguez et al., 2019). Ha sido en las regiones de las Sierras del Noroeste, en el complejo de Chiapas y en la Península de Yucatán, es decir, tres de las once regiones biogeográficas del maíz, que se ha reconocido un decremento en la riqueza de razas de la década de 1950 a la primera década del siglo XXI, lo cual refleja el incremento en la producción industrial del maíz, a través de la producción de maíces híbridos, especialmente en la zona de Sinaloa y en las tierras bajas de Chiapas (Perales & Golicher, 2014). La adopción de variedades comerciales es mucho más frecuente en las zonas de tierras bajas, en donde estos maíces tienen un mejor desempeño que en las tierras altas (Brush & Perales, 2007). Entonces, hay evidencia de que ha habido desplazamiento de los maíces nativos por los maíces híbridos, en especial en las zonas de tierras bajas. Por tanto, ante esta situación, la conservación de los maíces nativos en su centro de origen es importante para los pequeños productores, que dependen de su producción para su subsistencia, para los habitantes de las ciudades que dependemos del maíz como la base de nuestra alimentación, y para la humanidad en general, que deberá recurrir a la diversidad de cultivos nativos para continuar adaptándose a diversos tipos de cambios.

El maíz ante el cambio climático

El cambio climático es un problema latente para el cultivo del maíz, no sólo en México, sino en todo el mundo, pues la producción podría reducirse en al menos un 10% para el año 2055 en América Latina (Jones & Thornton, 2003). De igual manera, en Estados Unidos, que es el primer productor de maíz en el mundo, el cambio climático podría traer un decremento en las cosechas para el año 2030 (7.44% de decremento en el medio oeste de los Estados Unidos bajo un escenario extremo en donde la temperatura incremente 1.46°C y la precipitación decrezca un 30%) (Li et al., 2011). En México, en el año 2021, el 79.4% de la superficie sembrada de maíz se sostuvo por el temporal (SIAP, 2021a). Se espera que el cambio climático tenga impactos negativos principalmente en este tipo de agricultura porque actualmente la mayor parte de la infraestructura tecnológica y los programas gubernamentales están destinados a la agricultura de riego, lo cual

pone las cosechas de este tipo de agricultura en una situación de mayor vulnerabilidad ante el incremento en las temperaturas (Ureta et al., 2020) y el cambio en los patrones de precipitación (Murray-Tortarolo et al., 2018). Además, los maíces de las regiones de alta montaña son los más vulnerables al cambio climático porque cuando se siembran en zonas de altitud media, que se espera que sea el clima futuro de las zonas altas, la probabilidad de que estas variedades produzcan semillas de buena calidad se reduce del 83% en su zona de origen (en la zona de alta montaña) a tan solo el 24% (en las tierras medias), lo cual hará difícil su adaptación ante las nuevas condiciones climáticas, a menos que las variedades puedan evolucionar rápidamente (Mercer et al., 2008; Mercer & Perales, 2010). Esta problemática hace primordial la conservación *in situ* del germoplasma nativo en los centros de origen, proceso en el cual, las familias campesinas están haciendo un trabajo clave, ya que cada año, seleccionan alrededor de 5.24×10^8 plantas madre para conformar la siguiente generación y es a partir de este proceso de evolución por domesticación que las variedades nativas se están adaptando ante las condiciones cambiantes actuales (Bellon et al., 2018).

La importancia de la conservación *in situ* y *ex situ*

La conservación *in situ* se refiere a la permanencia de los cultivos a través de la siembra en las parcelas y al resguardo a nivel local en reservas y bancos, por el contrario, la conservación *ex situ* se refiere a la conservación del germoplasma en bancos de semillas o lugares que están fuera del contexto en donde se reproducen (Khoury et al., 2022; McLean-Rodríguez et al., 2021). La importancia de ambas estrategias de conservación ha sido discutida ampliamente, pues se ha visto que las poblaciones que son conservadas *in situ* tienen mayor diversidad genética que las que se conservan *ex situ* y que las poblaciones conservadas *ex situ* pueden pasar por un proceso de deriva génica o de endogamia (Gómez et al., 2005), lo cual sucede en parte porque las semillas son removidas del contexto socioecológico en el que han evolucionado y el proceso evolutivo de domesticación se detiene. Contrario a los maíces conservados *ex situ*, los maíces conservados *in situ* siguen evolucionando por la presión de selección ejercida por los productores y por las condiciones ambientales cambiantes, sin embargo, se ha visto que es factible reintroducir semillas de maíz conservadas *ex situ* de un lote del año 1967 a la actualidad, porque la distancia genética entre las semillas conservadas *in situ* y *ex situ* no es tan grande (McLean-Rodríguez et al., 2021). Aunque reintroducir las semillas de maíces que pudieran haberse perdido sea posible, si las

condiciones socioecológicas que permitían su producción, uso y reproducción no siguen vigentes, entonces es difícil que haya un espacio en donde puedan ser reintroducidas (Bellon et al., 2017). Por tal motivo, la conservación *in situ* o, dicho en otras palabras, la continuidad de la siembra, selección e intercambio de semillas es clave para que la diversidad de los maíces en específico, y de los cultivos en general pueda seguir su curso evolutivo de domesticación.

La conservación *in situ* de los distintos morfotipos de maíz nativo es un proceso que sucede en parte porque las familias campesinas necesitan maíces adaptados a diversas condiciones ambientales y agrícolas, pero se ha encontrado que los distintos usos que tiene cada tipo, es también un factor muy importante para su continuidad. González-Amaro (2016) describe que, en Oaxaca, el uso de los maíces es importante para la continuación de la diversidad porque los maíces se seleccionan y se siembran para distintos fines de uso. Los más abundantes son los que tienen más usos y, por tanto, las familias los siembran cada año para satisfacer sus necesidades. En cambio, los maíces que tienen pocos usos son los que menos se siembran y, por tanto, podrían perderse más fácilmente. Además, se ha visto que son las mujeres las que tienen un papel importante en la decisión de seguir sembrando una amplia variedad de maíces nativos, pues son ellas las que mayoritariamente se encargan de la preparación de los alimentos y prefieren los maíces nativos que los híbridos por cuestiones de sabor y porque son de mejor calidad para la preparación de ciertos alimentos como el tejate o el atole (González-Amaro, 2016; Van Cauwelaert, 2017).

Hay múltiples factores que ponen en riesgo la continuidad el proceso evolutivo de domesticación. De acuerdo a Bellon et al. (2015) los factores más importantes son i) la disponibilidad de variedades comerciales, ii) las cadenas de valor de los cultivares comerciales que dejan fuera a los nativos, iii) la disponibilidad de nuevos productos que pueden competir con los locales y iv) la diversificación del trabajo a actividades fuera de la parcela. Los programas y políticas que favorecen la sustitución de los maíces nativos también han aumentado el riesgo de que el proceso evolutivo de domesticación se detenga. Por ejemplo, el programa de modernización sustentable de la agricultura tradicional (MasAgro), dirigido a pequeños productores con terrenos menores a 5 hectáreas en zonas de temporal de 30 estados de la república, que fue implementado en el periodo 2011-2021 por la Secretaría de Desarrollo Rural (SADER) y el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), pretendió aumentar la superficie de maíces híbridos de 1.5 millones de hectáreas a 3 millones de hectáreas a través de la facilitación de semillas, lo

cual supondría un decremento del 25 al 50% de la superficie sembrada de maíz nativo, y conduciría a la pérdida de la agrobiodiversidad del mismo, como resultado, en el periodo 2011-2016, se registraron 23 híbridos nuevos y se entregaron 56,060 kg de semilla pre-comercial (CEMDA, 2016). Otro ejemplo es el Programa de reconversión de cultivos, que tuvo lugar del año 2013 al 2018, y que tenía como objetivo “modificar el patrón de producción tradicional considerando el establecimiento de cultivos alternativos con mayor viabilidad agronómica, rentabilidad económica y respuesta social”, el cual abarcó 30 estados de la república, exceptuando la Ciudad de México y Baja California Sur, con el cual hubo una reconversión de aproximadamente 900,000 hectáreas de agricultura “tradicional” (incluida la milpa) hacia otros cultivos (SAGARPA, 2016).

Las redes de semillas y su importancia para la conservación *in situ*

En el contexto de pequeños productores en México, los sistemas locales de semillas de maíz y sus redes de semillas son especialmente importantes para la conservación *in situ* de la diversidad del cultivo (Badstue et al., 2007; Bellon et al., 2011; Gómez et al., 2004; Llamas Guzmán, 2020; Louette, 1997; Sotelo, 2017) y pueden representar un seguro para el reabastecimiento de semillas en casos de eventos climáticos extremos en donde hay escasez o pérdida de las mismas (Fenzi et al., 2022). En los sistemas locales de semillas, las familias campesinas reproducen localmente las semillas, al seleccionarlas, almacenarlas para la siembra del siguiente ciclo agrícola e intercambiarlas con otros hogares, comúnmente de su familia, ya sea en su comunidad o en comunidades aledañas (Almekinders et al., 1994). Entonces, estos intercambios que hacen los hogares entre sí y que son parte del sistema local de semillas, forman las redes de intercambio de semillas (Pautasso et al., 2012).

En las comunidades campesinas en donde se han hecho estudios de los sistemas locales de semillas de maíz, se ha documentado que solamente alrededor de un tercio de las semillas para siembra se obtienen fuera del hogar, siendo lo más común el autoabasto (Badstue et al., 2007; Louette, 1997). Además, el uso de semillas híbridas tiende a ser poco frecuente, en especial en regiones de alta montaña (Brush & Perales, 2007). En los Valles Centrales de Oaxaca, las razones principales para obtener semillas fuera del hogar son la experimentación y, en menor medida, la falta de semillas; en contraste, la razón más frecuente para darlas es la responsabilidad social que se tiene con los otros miembros de la comunidad (Badstue et al., 2007). Por el contrario, en el estado de Jalisco, México, la principal razón para obtener semillas es la falta de las mismas, y los

hogares que necesitan obtener semillas más frecuentemente son los que cosechan una menor cantidad de maíz, debido a que la cantidad cosechada no es suficiente para el sustento del hogar a través del ciclo agrícola, quedándose sin oportunidad de resguardar una porción para sembrar (Louette, 1997). Cuando hay transferencia de semillas entre dos hogares, las semillas suelen intercambiarse a través de las relaciones sociales preexistentes, por ejemplo, en los Valles Centrales de Oaxaca, los hogares intercambian con familiares (41.2% de las veces), conocidos (29.6% de las veces), amigos (7.2% de las veces) o vecinos (1.3% de las veces) (Badstue et al., 2007). La herencia patrilineal es frecuente; en los altos de Chiapas, por ejemplo, cuando un nuevo núcleo familiar se constituye, las semillas son otorgadas del padre al hijo que forma el nuevo hogar (Sotelo, 2017). Además, lo más frecuente es que las semillas provengan de la misma comunidad (Louette, 1997), debido a que las redes de intercambio están sustentadas por las relaciones sociales preexistentes (Llamas-Guzmán et al., 2022) y a que los maíces están adaptados a sus condiciones altitudinales específicas (Mercer et al., 2008).

Las redes de intercambio de diversos cultivos, no sólo del maíz, son importantes para la conservación *in situ* porque, al intercambiar semillas, las familias difunden las variedades que siembran en sus parcelas, de tal forma que sigan presentes en la comunidad y, en caso de que alguna familia de la comunidad pierda sus semillas, puede acceder a ellas de nuevo y seguir sembrando la variedad en cuestión (McGuire & Sperling, 2016). Además, si una familia intercambia con muchos hogares, puede acceder a mayor cantidad de variedades presentes en la comunidad. Se ha visto para diversos cultivos en regiones de Europa (semillas de huertos de traspatio), Asia (semillas alforfón *Fagopyrum tataricum*) y América Latina (semillas de maíz y frijol) que los hogares que intercambian más, son generalmente los que tienen mayor diversidad de cultivos en sus parcelas o huertos de traspatio (Calvet-Mir et al., 2012; Llamas-Guzmán et al., 2022; Song et al., 2019) o los que tienen mayor conocimiento asociado a los cultivos (Abizaid et al., 2016). Además, las redes de intercambio están asociadas al flujo genético, por lo cual, si no se intercambian semillas a través de las redes, los cultivos podrían pasar por un proceso de endogamia (Thomas et al., 2012), como se ha propuesto anteriormente para el maíz en una región de alta montaña (Leyva-Madrigal et al., 2020).

Las redes de intercambio de maíz en las zonas de alta montaña, en donde los maíces están adaptados a condiciones muy específicas y son vulnerables a las condiciones futuras bajo los

efectos del cambio climático (Mercer et al., 2008; Mercer & Perales, 2010), son especialmente importantes para la difusión de las variedades adecuadas a las nuevas condiciones socioecológicas. Sin embargo, de acuerdo con un estudio hecho por Bellon et al. (2011), los hogares que siembran maíz en regiones de alta montaña, tendrían que acceder a nuevas redes de intercambio para poder acceder a variedades adecuadas a las condiciones futuras. Es por esto por lo que es muy importante evaluar en las zonas de alta montaña, qué papel están jugando las redes de intercambio de semillas en la conservación *in situ* del maíz, y cuáles son los factores que están moldeando su funcionamiento tanto a nivel de comunidad como a nivel de hogar.

El análisis de redes sociales como aproximación metodológica para el estudio de las redes de semillas

El análisis de redes sociales es una herramienta útil para estimar la influencia relativa de los múltiples factores a nivel comunitario y a nivel de hogar que moldean el funcionamiento de las redes de intercambio de semillas (Song et al., 2019; Labeyrie et al., 2016; Ricciardi, 2015). Esta aproximación ha sido utilizada como base teórica para proponer medidas de conservación *in situ* del germoplasma (Abay et al., 2011; Calvet-Mir et al., 2012; Pautasso et al., 2012; Ricciardi, 2015). Por ejemplo, ha sido útil para identificar a las personas clave, es decir, las personas que intercambian semillas con mayor frecuencia, y que frecuentemente son las que producen una mayor agrobiodiversidad en su parcela (Calvet-Mir et al., 2012). Al identificarlas se les puede asesorar para la producción y el mantenimiento de semillas por medio del mejoramiento participativo o brindando información clave (Abay et al., 2011), además de brindarles semillas de otras comunidades para incrementar el flujo génico de las variedades locales (Aw-Hassan et al., 2008). Las redes en general se componen por nodos y por enlaces (Hanneman y Riddle, 2005) y en el contexto de las redes de semillas, los hogares constituyen los nodos de la red y los intercambios de semillas los enlaces (Abay et al., 2011; Labeyrie et al., 2016; Pautasso, 2015).

Una forma de comparar la vulnerabilidad de las redes de las comunidades debido a la fragmentación es midiendo su robustez. La robustez se refiere a la capacidad que tiene una red de permanecer conectada aun cuando sus nodos son removidos uno a uno (González González et al., 2021; Piraveenan et al., 2013). En el caso de las redes de semillas, la robustez indica la medida en la que los hogares podrían seguir accediendo a semillas en caso de que ciertos hogares dejaran de formar parte de la red. En este estudio evaluamos si la robustez de las redes de semillas de las

comunidades con mayor acceso a los centros urbanos es distinta a la de las redes de las comunidades con menor acceso.

Una manera de formalizar el estudio de las redes de semillas en el nivel de hogar son los Modelos Exponenciales de Grafos Aleatorios (ERGM por sus siglas en inglés), una familia de modelos estadísticos para el análisis de redes sociales, que permiten poner a prueba hipótesis sobre cómo las características de los nodos determinan la probabilidad de que haya enlaces entre ellos (Lusher et al., 2013). Han sido utilizados anteriormente para el estudio de las redes de semillas con el fin de evaluar la tendencia de los hogares a intercambiar semillas entre familias con características etnolingüísticas iguales, es decir, la tendencia a la homofilia (Labeyrie et al., 2016). En este estudio utilizamos un ERGM de selección social (Lusher et al., 2013) para saber si las características sociodemográficas de cada hogar tienen influencia en la probabilidad de que el hogar provea semillas a otros hogares. En este modelo las características sociodemográficas son las variables predictoras y la probabilidad de intercambiar semillas es la variable de respuesta (Lusher et al., 2013).

Objetivos

El presente estudio tuvo como objetivo general analizar cómo difieren las redes de semillas de maíz de nueve comunidades de la región de alta montaña del Cofre de Perote, de acuerdo a su accesibilidad a los centros urbanos y sus mercados y evaluar si las características sociodemográficas y el tipo de parcela que poseen los hogares tienen un efecto en su participación en el sistema local de semillas y si la estructura de la red de intercambio tiene una relación con el número de morfotipos de maíz que conservan las familias.

Para lograr el objetivo general, planteamos los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los morfotipos de maíz que producen los hogares en nueve comunidades de la región del Cofre de Perote.
- Definir la relación entre la accesibilidad a los centros urbanos de nueve comunidades y el número de hogares que compran semillas de maíz híbrido en la región del Cofre de Perote.
- Identificar si hay una relación entre la accesibilidad a los centros urbanos y la robustez de la red de intercambio de semillas de nueve comunidades de la región del Cofre de Perote.

- Distinguir si hay una relación entre las características sociodemográficas (género de la persona que intercambia, el número de personas en el hogar, la antigüedad de la siembra de maíz y si los hogares tienen suficiente maíz para comer durante todo el ciclo agrícola) y el tamaño del terreno y la probabilidad de que un hogar haga intercambios en la red de nueve comunidades de la región del Cofre de Perote.
- Evaluar si hay una relación entre el número de intercambios que realizan los hogares en la red de intercambio de semillas y la riqueza de morfotipos de maíz que producen las familias de nueve comunidades de la región del Cofre de Perote.

REFERENCIAS

- Abay, F., de Boef, W., & Bjørnstad, Å. (2011). Network analysis of barley seed flows in Tigray, Ethiopia: Supporting the design of strategies that contribute to on-farm management of plant genetic resources. *Plant Genetic Resources*, 9(4), 495–505.
<https://doi.org/10.1017/S1479262111000773>
- Abizaid, C., Coomes, O. T., & Perrault-Archambault, M. (2016). Seed Sharing in Amazonian Indigenous Rain Forest Communities: A Social Network Analysis in three Achuar Villages, Peru. *Human Ecology*, 44(5), 577–594. <https://doi.org/10.1007/s10745-016-9852-7>
- Aguilar, J., Illsley, C., & Marielle, C. (2003). Los sistemas agrícolas de maíz y sus procesos técnicos. In *Sin maíz no hay país* (pp. 83–121). CONACULTA.
- Almekinders, C. J. M., Louwaars, N. P., & de Bruijn, G. H. (1994). Local seed systems and their importance for an improved seed supply in developing countries. *Euphytica*, 78(3), 207–216. <https://doi.org/10.1007/BF00027519>
- Aw-Hassan, A., Mazid, A., & Salahieh, H. (2008). THE ROLE OF INFORMAL FARMER-TO-FARMER SEED DISTRIBUTION IN DIFFUSION OF NEW BARLEY VARIETIES IN SYRIA. *Experimental Agriculture*, 44(3), 413–431.
<https://doi.org/10.1017/S001447970800642X>
- Badstue, L. B., Bellon, M. R., Berthaud, J., Ramírez, A., Flores, D., & Juárez, X. (2007). The Dynamics of Farmers' Maize Seed Supply Practices in the Central Valleys of Oaxaca, Mexico. *World Development*, 35(9), 1579–1593.
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2006.05.023>
- Bartra, A. (2009). Hacer milpa. *Ciencias*, 92, 42–45.
- Bellon, M. R., Adato, M., Becerril, J., & Mindek, D. (2006). Poor farmers' perceived benefits from different types of maize germplasm: The case of creolization in lowland tropical Mexico. *World Development*, 34(1), 113–129.
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2005.05.012>
- Bellon, M. R., Dulloo, E., Sardos, J., Thormann, I., & Burdon, J. J. (2017). In situ conservation-harnessing natural and human-derived evolutionary forces to ensure future crop adaptation. *Evolutionary Applications*, 10(10), 965–977.
<https://doi.org/10.1111/eva.12521>

- Bellon, M. R., Gotor, E., & Caracciolo, F. (2015). Conserving landraces and improving livelihoods: How to assess the success of on-farm conservation projects? *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(2), 167–182. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.986363>
- Bellon, M. R., Hodson, D., & Hellin, J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(33), 13432–13437. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103373108>
- Bellon, M. R., Mastretta-Yanes, A., Ponce-Mendoza, A., Ortiz-Santamaría, D., Oliveros-Galindo, O., Perales, H., Acevedo, F., & Sarukhán, J. (2018). Evolutionary and food supply implications of ongoing maize domestication by Mexican *campesinos*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1885), 20181049. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1049>
- Berlan, J. P., & Lewontin, R. C. (1986). The political economy of hybrid corn. *Monthly Review*, 38, 35–48.
- Brush, S. B., & Perales, H. R. (2007). A maize landscape: Ethnicity and agro-biodiversity in Chiapas Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121(3), 211–221. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.018>
- Calvet-Mir, L., Calvet-Mir, M., Molina, J. L., & Reyes-García, V. (2012). Seed Exchange as an Agrobiodiversity Conservation Mechanism. A Case Study in Vall Fosca, Catalan Pyrenees, Iberian Peninsula. *Ecology and Society*, 17(1), art29. <https://doi.org/10.5751/ES-04682-170129>
- Ceccon, E. (2008). La revolución verde: Tragedia en dos actos. *Ciencias*, 1(91), 21–29.
- CEMDA. (2016). *Informe sobre la pertinencia biocultural de la legislación mexicana y su política pública para el campo. El caso del programa de “Modernización sustentable de la agricultura tradicional” (MasAgro)*. Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C.
- CONABIO. (2013). *Proyecto global de maíces nativos*. Biodiversidad Mexicana. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/proyectoMaices>
- Eakin, H., Perales, H., Appendini, K., & Sweeney, S. (2014). Selling Maize in Mexico: The Persistence of Peasant Farming in an Era of Global Markets: Selling Maize in Mexico. *Development and Change*, 45(1), 133–155. <https://doi.org/10.1111/dech.12074>
- Eakin, H., Sweeney, S., Lerner, A. M., Appendini, K., Perales, H. R., Steigerwald, D. G., Dewes, C. F., Davenport, F., & Bausch, J. C. (2018). Agricultural change and resilience: Agricultural policy, climate trends and market integration in the Mexican maize system. *Anthropocene*, 23, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2018.08.002>
- Esteva, G., & Marielle, C. (2003). *Sin maíz no hay país*. CONACULTA.
- FAO. (2021). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2021*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb4477en>
- Fenzi, M., Rogé, P., Cruz-Estrada, A., Tuxill, J., & Jarvis, D. (2022). Community seed network in an era of climate change: Dynamics of maize diversity in Yucatán, Mexico. *Agriculture and Human Values*, 39(1), 339–356. <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10249-3>
- Fernández, R., Morales, L. A., & Gálvez, A. (2013). Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional. Una revisión indispensable. *Rev. Fitotec. Mex.*, 36, 275–283.
- Gómez, M., Latournerie, L., Arias, L. M., Canul, J., & Tuxill, J. (2004). Sistema informal de abastecimiento de semillas de los cultivos de la milpa de Yaxcabá, Yucatán. In *Manejo*

- de la diversidad de los cultivos en los agroecosistemas tradicionales* (pp. 150–156). Bioversity International.
- Gómez, O. J., Blair, M. W., Frankow-Lindberg, B. E., & Gullberg, U. (2005). Comparative Study of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Landraces Conserved ex situ in Genebanks and in situ by Farmers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 52(4), 371–380. <https://doi.org/10.1007/s10722-005-2249-x>
- González, C. G., García, T. L., Jardón-Barbolla, L., & Benítez, M. (2020). Linking coleopteran diversity with agricultural management of maize agroecosystems in Oaxaca, Mexico. *BioRxiv*, 2020.01.07.897744. <https://doi.org/10.1101/2020.01.07.897744>
- González González, C., Van Cauwelaert, E. M., Boyer, D., Perfecto, I., Vandermeer, J., & Benítez, M. (2021). High-order interactions maintain or enhance structural robustness of a coffee agroecosystem network. *Ecological Complexity*. <https://doi.org/10.1101/2021.02.22.432328>
- González-Amaro, R. (2016). *Usos locales y preferencias de consumo como factores de la diversidad del maíz nativo de Oaxaca* [Doctorado]. El Colegio de la Frontera Sur.
- Hanneman, R. A., & Riddle, M. (2005). *Introduction to Social Network Methods*. Riverside, CA: University of California.
- Harlan, J. R. (1975). Our Vanishing Genetic Resources. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.188.4188.618>
- INEGI. (2019). *Encuesta nacional agropecuaria*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2019/doc/irg_ena2019.pdf
- Jones, P., & Thornton, P. (2003). The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*, 13(1), 51–59. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(02\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(02)00090-0)
- Kato-Yamakake, T. (2009). Teorías sobre el origen del maíz. In *Origen y diversificación del maíz: Una revisión analítica*. (1era ed., pp. 43–68). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Khoury, C. K., Brush, S., Costich, D. E., Curry, H. A., Haan, S., Engels, J. M. M., Guarino, L., Hoban, S., Mercer, K. L., Miller, A. J., Nabhan, G. P., Perales, H. R., Richards, C., Riggins, C., & Thormann, I. (2022). Crop genetic erosion: Understanding and responding to loss of crop diversity. *New Phytologist*, 233(1), 84–118. <https://doi.org/10.1111/nph.17733>
- Kloppenborg, J. R. (2004). *First the seed: The political economy of plant biotechnology, 1492-2000* (2nd ed). University of Wisconsin Press.
- Labeyrie, V., Thomas, M., Muthamia, Z. K., & Leclerc, C. (2016). Seed exchange networks, ethnicity, and sorghum diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(1), 98–103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1513238112>
- Leyva-Madrigal, Báez-Astorga, Negrete-Yankelevich, Núñez-de la Mora, Amescua-Villela, & Maldonado Mendoza. (2020). Maize genetic diversity in traditionally cultivated polycultures in an isolated rural community in Mexico: Implications for management and sustainability. *Plant Ecology & Diversity*, 15.
- Li, X., Takahashi, T., Suzuki, N., & Kaiser, H. M. (2011). The impact of climate change on maize yields in the United States and China. *Agricultural Systems*, 104(4), 348–353. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.12.006>
- Linares, E., & Bye, R. (2015). LAS ESPECIES SUBUTILIZADAS DE LA MILPA. *Revista digital universitaria*, 16(5), 22.

- Llamas Guzmán, L. (Ed.). (2020). Redes de abastecimiento de semillas como un bien común, caso de estudio Ixtenco, Tlaxcala, México. In *Retos latinoamericanos en la lucha por los comunes: Historias a compartir*. CLACSO.
- Llamas-Guzmán, L. P., Lazos Chavero, E., Perales Rivera, H. R., & Casas, A. (2022). Seed Exchange Networks of Native Maize, Beans, and Squash in San Juan Ixtenco and San Luis Huamantla, Tlaxcala, Mexico. *Sustainability*, 14(7), 3779. <https://doi.org/10.3390/su14073779>
- Louette, D. (1997). Seed exchange among farmers and gene flow among maize varieties in traditional agricultural systems. In *Gene Flow Among Maize Landraces, Improved Maize Varieties, and Teosinte: Implications for Transgenic Maize*. CIMMYT.
- Lusher, D., Koskien, J., & Robins, G. (2013). *Exponential Random Graph Models for Social Networks*. Cambridge University Press.
- McGuire, S., & Sperling, L. (2016). Seed systems smallholder farmers use. *Food Security*, 8(1), 179–195. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0528-8>
- McLean-Rodríguez, F. D., Camacho-Villa, T. C., Almekinders, C. J. M., Pè, M. E., Dell'Acqua, M., & Costich, D. E. (2019). The abandonment of maize landraces over the last 50 years in Morelos, Mexico: A tracing study using a multi-level perspective. *Agriculture and Human Values*. <https://doi.org/10.1007/s10460-019-09932-3>
- McLean-Rodríguez, F. D., Costich, D. E., Camacho-Villa, T. C., Pè, M. E., & Dell'Acqua, M. (2021). Genetic diversity and selection signatures in maize landraces compared across 50 years of in situ and ex situ conservation. *Heredity*, 126(6), 913–928. <https://doi.org/10.1038/s41437-021-00423-y>
- Méndez Rojas, D. A. (2017). Notas para una historia transnacional de la revolución verde. *Cuadernos Americanos*, 4(162), 137–164.
- Mercer, K. L., & Perales, H. R. (2010). Evolutionary response of landraces to climate change in centers of crop diversity. *Evolutionary Applications*, 3(5–6), 480–493. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00137.x>
- Mercer, K., Martínez-Vásquez, Á., & Perales, H. R. (2008). Asymmetrical local adaptation of maize landraces along an altitudinal gradient: Local adaptation of maize. *Evolutionary Applications*, 1(3), 489–500. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2008.00038.x>
- Moreno-Sáenz, L. I., & González-Andrade, S. (2016). *Dependencia de México a las importaciones de maíz en la era del TLCAN* Mexico's dependence on maize imports in the age of NAFTA*. 7, 115–126.
- Murray-Tortarolo, G. N., Jaramillo, V. J., & Larsen, J. (2018). Food security and climate change: The case of rainfed maize production in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253–254, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.011>
- Negrete-Yankelevich, S., Porter-Bolland, L., Blanco-Rosas, J. L., & Barois, I. (2013). Historical Roots of the Spatial, Temporal, and Diversity Scales of Agricultural Decision-Making in Sierra de Santa Marta, Los Tuxtlas. *Environmental Management*, 52(1), 45–60. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0095-8>
- Orozco-Ramírez, Q., Perales, H. R., & Hijmans, R. J. (2017). Geographical distribution and diversity of maize (*Zea mays* L. subsp. *Mays*) races in Mexico. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 64(5), 855–865. <https://doi.org/10.1007/s10722-016-0405-0>
- Pautasso, M. (2015). Network simulations to study seed exchange for agrobiodiversity conservation. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 145–150. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0222-9>

- Pautasso, M., Aistara, G., Barnaud, A., Caillon, S., Clouvel, P., Coomes, O., Delêtre, M., Demeulenaere, E., Santis, P., Döring, T., Eloy, L., Emperaire, L., Garine, E., Goldringer, I., Jarvis, D., Joly, H., Leclerc, C., Louafi, S., Martin, P., ... Tramontini, S. (2012). Seed exchange networks for agrobiodiversity conservation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 151–175. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0089-6>
- Perales, H. R., & Golicher, D. (2014). Mapping the Diversity of Maize Races in Mexico. *PLoS ONE*, 9(12), e114657. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114657>
- Piperno, D. R. (2011). The Origins of Plant Cultivation and Domestication in the New World Tropics: Patterns, Process, and New Developments. *Current Anthropology*, 52(S4), S453–S470. <https://doi.org/10.1086/659998>
- Piperno, D. R. (2018). A model of agricultural origins. *Nature Human Behaviour*, 2(7), 446–447. <https://doi.org/10.1038/s41562-018-0390-8>
- 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(13), 5019–5024. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812525106>
- Piraveenan, M., Thedchanamoorthy, G., Uddin, S., & Chung, K. S. K. (2013). Quantifying topological robustness of networks under sustained targeted attacks. *Social Network Analysis and Mining*, 3(4), 939–952. <https://doi.org/10.1007/s13278-013-0118-8>
- Ricciardi, V. (2015). Social seed networks: Identifying central farmers for equitable seed access. *Agricultural Systems*, 139, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.07.002>
- Rivera-Núñez, T., García-Barrios, L., Benítez, M., Rosell, J. A., García-Herrera, R., & Estrada-Lugo, E. (2022). Unravelling the Paradoxical Seasonal Food Scarcity in a Peasant Microregion of Mexico. *Sustainability*, 14(11), 6751. <https://doi.org/10.3390/su14116751>
- SAGARPA. (2016). *Refuerza SAGARPA reconversión de cultivos en beneficio de productores y cadenas de valor*. Gobierno de México. <http://www.gob.mx/agricultura%7Czacatecas/es/articulos/refuerza-sagarpa-reconversion-de-cultivos-en-beneficio-de-productores-y-cadenas-de-valor-140075>
- Serna-Saldívar, S. O., Gutiérrez-Urbe, J. A., & Mora-Rochin, S. (2013). *POTENCIAL NUTRACEÚTICO DE LOS MAÍCES CRIOLLOS Y CAMBIOS DURANTE EL PROCESAMIENTO TRADICIONAL Y CON EXTRUSIÓN NUTRACEUTICAL POTENTIAL OF NATIVE MAIZE AND CHANGES DURING TRADITIONAL AND EXTRUSION PROCESSING*. 36, 10.
- SIAP. (2007). *Situación actual y perspectivas del maíz en México 1996 –2012*. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaDerivada/ComercioExterior/Estudios/Perspectivas/maiz96-12.pdf
- SIAP. (2021a). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIAP. (2021b). *Escenario mensual de productos agroalimentarios. Maíz blanco*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/629686/Escenario_maiz_blanco_mar21.pdf
- SIAP. (2022). *Balanza disponibilidad consumo*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/729354/Balanza_disponibilidad_consumo_mayo22.pdf

- Song, Y., Fang, Q., Jarvis, D., Bai, K., Liu, D., Feng, J., & Long, C. (2019). Network Analysis of Seed Flow, a Traditional Method for Conserving Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) Landraces in Liangshan, Southwest China. *Sustainability*, 11(16), 4263. <https://doi.org/10.3390/su11164263>
- Sotelo, C. (2017). *El parentesco en la transmisión de semillas campesinas en Las Margaritas, Chiapas* [Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural]. El Colegio de la Frontera Sur.
- Thomas, M., Demeulenaere, E., Dawson, J. C., Khan, A. R., Galic, N., Jouanne-Pin, S., Remoue, C., Bonneuil, C., & Goldringer, I. (2012). On-farm dynamic management of genetic diversity: The impact of seed diffusions and seed saving practices on a population-variety of bread wheat. *Evolutionary Applications*, 5(8), 779–795. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2012.00257.x>
- Turrent, A., Wise, T., & Garvey, A. (2012). *Factibilidad de alcanzar el potencial productivo de maíz de México*. Mexican Rural Development Research Report.
- Ureta, C., González, E. J., Espinosa, A., Trueba, A., Piñeyro-Nelson, A., & Álvarez-Buylla, E. R. (2020). Maize yield in Mexico under climate change. *Agricultural Systems*, 177, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102697>
- U.S. Grain Council. (2021). *Corn. Production and exports*. U.S. GRAINS COUNCIL. <https://grains.org/buying-selling/corn/>
- Van Cauwelaert, E. (2017). *Diagnóstico del movimiento comercial del maíz y de las relaciones económicas y culturales-simbólicas para la siembra del maíz criollo en la Villa de Zaachila, Oaxaca: Un enfoque desde las familias campesinas*. Universidad Internacional de Andalucía.
- van Heerwaarden, J., Doebley, J., Briggs, W. H., Glaubitz, J. C., Goodman, M. M., de Jesus Sanchez Gonzalez, J., & Ross-Ibarra, J. (2011). Genetic signals of origin, spread, and introgression in a large sample of maize landraces. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(3), 1088–1092. <https://doi.org/10.1073/pnas.1013011108>
- Wegier, A., Alavez, V., Pérez-López, J., Calzada, L., & Cerritos, R. (2018). Beef or grasshopper hamburgers: The ecological implications of choosing one over the other. *Basic and Applied Ecology*, 26, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2017.09.004>

Seed exchange networks for agrobiodiversity conservation: the case of maize in a highland region of Mexico

Sofía Lugo-Castilla; Mariana Benítez; Luciana Porter-Bolland; Simoneta Negrete-Yankelevich

Abstract

Seed networks are formed by seed exchanges between smallholder households and are central to food security and to *in situ* agrobiodiversity conservation. Currently smallholders are changing their livelihood strategies and this could be molding seed network structures and impacting crop diversity. The influence of urban centers could be of particular relevance for seed networks; however, formal evidence of this relationship is scarce. Through interviews carried out in the Cofre de Perote highland region, we conducted a social network analysis followed by generalized linear modeling in nine rural communities, and found that less robust community seed networks occur closer to urban poles. Within communities, we assessed whether the probability of a household giving maize seeds, depended on its sociodemographic and plot characteristics. Families exchange principally because of seed shortage, and the ones that were seed providers were generally those with larger plots, more planting experience, enough maize for the cropping season and had fewer members, which enabled them to save seeds for the next cropping season. Additionally, household exchange because they want to test another morphotypes, and we found that households that exchanged more frequently, produced a greater number of morphotypes, thus promoting crop diversity conservation. We concluded that the maize seed networks under study are serving as seed reservoirs for families in case of scarcity, thus contributing to food security, and are also important for *in situ* agrobiodiversity conservation of six maize morphotypes. However, it is necessary to promote seed exchanges between households of communities that increasingly have access to urban centers, in order to strengthen their networks and therefore preserve their seed scarcity dampening function.

Keywords Seed exchange networks; Agrobiodiversity conservation; Market accessibility; Commercial seeds; Maize

Introduction

Smallholder households represent around 85% of production units worldwide (Lowder et al., 2016), enabling ongoing crop evolution under domestication and food supply for rural and urban populations (Bellon et al., 2018, 2021). Smallholders that produce annual crops commonly select

the best grains from their harvest and save these as seeds for the next cropping season, however, it is frequent that they exchange seeds with other households, thus building up local seed exchange networks (Coomes et al., 2015; Pautasso et al., 2012). Seed exchange networks are usually related to agrobiodiversity conservation (Pautasso et al., 2012), but current sociodemographic conditions in Mexico are driving rural communities to increasingly integrate into urban centers and their markets (Eakin et al., 2018). In addition, many smallholder households that cultivate maize mostly for self-consumption (Bellon et al., 2021), are struggling to meet grain self-sufficiency for the entire cropping season (Novotny et al., 2021; Rivera-Núñez et al., 2022). These circumstances could be having an impact on the probability of households saving, giving, or receiving seeds from other households, thus molding the structure of seed networks.

Mexico, considered the center of origin of maize (Piperno, 2018), has been domesticating and cultivating this plant in *milpas* (maize-based traditional polyculture) for approximately 9,000 years (Piperno et al., 2009). *Milpas* continue to be a central part in the life and nutrition of thousands of indigenous and peasant households (Novotny et al., 2021). Maize is the most important food crop for the rural and urban populations in Mexico (Fernández et al., 2013). According to the Agrifood and Fisheries Information Service of Mexico (SIAP, 2007), around 85% of maize producers are smallholders with plots smaller than 5 hectares. They hold the potential of feeding 54.7 million people in Mexico with their work (Bellon et al., 2018). Smallholders of highlands predominantly produce native varieties (Perales et al., 2003). In the face of climate change, highland native varieties are the most threatened because they are adapted to very specific local climates and, probably, will not perform well in changing conditions (Mercer & Perales, 2010). This is why, highland seed networks are assumed to be very important for sustaining a diverse and adequate germplasm for future conditions (Bellon et al., 2011). In this sense, seed exchange networks are key for agrobiodiversity conservation (Pautasso et al., 2012) since it has been registered for some regions that households that exchange more seeds, are the ones that produce a greater crop diversity (Calvet-Mir et al., 2012; Llamas-Guzmán et al., 2022; Song et al., 2019). However, this is not the case in other contexts (Abizaid et al., 2016; Kawa et al., 2013; Thomas & Caillon, 2016). Therefore, it is necessary to evaluate if seed exchange networks contribute to maize diversity conservation, in the highlands of the center of origin of maize, where evolution under domestication is ongoing.

Multiple factors could drive the level of dependence of a community on its local seed exchange network, and as a consequence, determine its structure. Network structure in this context is defined by the way (frequency and identity of participants) that households of a community exchange between them. Rural communities are increasingly integrating into urban poles and different types of markets (Eakin et al., 2018). The latter including both local markets, in which there is an exchange of agrobiodiversity produced in different eco-regions (Loterio-Velásquez et al., 2022), and formal seed markets, referring to the system of production and distribution of commercial seeds by companies (Almekinders et al., 1994; Berlan & Lewontin, 1986). These changes could be molding the structure of community seed networks. Formal seed markets have a greater presence in communities that are more integrated into urban centers having better physical and economic access to selling markets (Brush & Perales, 2007). In these contexts, the adoption of commercial varieties could be having a negative impact on landrace diversity (McLean-Rodríguez et al., 2019; Zimmerer et al., 2019), and consequently on network structures. If households join formal seed markets and stop producing and exchanging local varieties, eventually local networks would have fewer members and get fragmented. It is known that the formal and local seed systems coexist (Almekinders et al., 1994), even though formal markets tend to displace local agrobiodiversity (Kloppenburg, 2004). But it is unclear to what extent the presence of formal markets alter the structure of local seed networks. Furthermore, in Mexico, the growth of cities is changing smallholder's livelihoods (Lerner & Appendini, 2011), because they are diversifying labor into non-farm activities due to market integration, and agriculture is ceasing to be the principal activity (Eakin et al., 2018). This fact could drive households to exchange less or even stop exchanging seeds. Moreover, kinship relations are known to be less frequent in communities that are closer to urban areas (Colleran, 2020) and as seed networks are often supported by kinship relations (Labeyrie et al., 2016), accessibility to urban centers could be a driver of network fragmentation. However, to our knowledge, there are no quantitative studies of the extent to which access to urban poles and associated changes in livelihood strategies relate to the structure of maize local seed networks.

Farmer households function as a production unit, as they rely on their own labor to make the living from the land, even though sometimes they get engaged on non-agricultural labor (Chayanov, 1966). According to Boserup's classical theory (Boserup, 1965), the decrease in land access by farmer households (driven by population growth) results in land-use change and

agricultural intensification at the community level. Even if population density is not the only driver of land-use change (Meyfroidt et al., 2018), in Latin America there is a known decreasing trend in the plot size of newly founded households (Lowder et al., 2016; Negrete-Yankelevich et al., 2013). As a consequence, younger households have smaller productions (Pacheco-Cobos et al., 2015) and find it harder to produce enough food to meet their annual grain needs (Rivera-Núñez et al., 2022). Moreover, if the number of household members exceeds production capacity, it could be harder for households to save a part of the harvest for seeds. If households are not able to allocate part of the production to save seeds for the next cropping season, they are likely to acquire seeds through seed networks, requesting them to households that have larger productions (Louette et al., 1997). In other rural contexts, seed networks are useful to obtain seeds in case of harvest failure (van Niekerk & Wynberg, 2017). However, the extent to which household characteristics influence their exchange frequency, and, the capacity of seed networks to function for seed replenishment in case of scarcity, remains underexplored.

In addition to the previously described pattern, recently in Latin America, men are increasingly migrating and engaging on off-farm labor, which leads women to take care of agricultural tasks (Deere, 2009). Classical peasant theory postulates that, in households, there is a division of labor based on gender, in which men are engaged in productive tasks and women in domestic labor (Chayanov, 1966). Seed provisioning and exchanging is considered a productive task managed by men in some regions (Ricciardi, 2015) but currently, it is no longer clear if men or women are more frequently exchanging seeds in different contexts.

Considering these facts, it is important to evaluate which are the factors that are having an influence on the structure of seed networks. To do this, Social Network Analysis (SNA) can be helpful, because it addresses formally the study of the structure of a set of nodes and the interactions between them (Scott & Carrington, 2011) and has been a useful approach to estimate the relative influence of the multiple factors that model seed network functioning (Pautasso et al., 2012). In a seed network context, households constitute the nodes and seed exchanges are the edges of the network (Labeyrie et al., 2021). SNA has been used to analyze the contribution of seed networks to agrobiodiversity conservation (Calvet-Mir et al., 2012; Llamas-Guzmán et al., 2022), and to evaluate the social relations that structure their functioning (Labeyrie et al., 2016). A way to compare the vulnerability of community seed networks due to fragmentation is by

measuring their robustness. Robustness refers to the capacity of a network to keep connected even if each one of its nodes is removed one by one (Piraveenan et al., 2013). In the case of seed networks, robustness indicates the extent to which households could keep on obtaining seeds in a scenario where certain households will no longer belong to the network. Moreover, Exponential Random Graph Models (ERGM), can be used to estimate the explanatory potential of household characteristics on the probability that there are exchange links between them (Lusher et al., 2013).

The highlands of the Cofre de Perote region in southeast Mexico, represent a useful case study to evaluate the factors that model local seed exchange networks because, as in other tropical high-elevation regions, local networks are the main source of seeds outside household units (Bellon et al., 2011) as commercial varieties are only moderately present (Khoury et al., 2022; Perales et al., 2003). In this context in which smallholders depend on their seeds and seed networks for their provisioning, we use SNA and ERGM to formally explore the sociodemographic characteristics that structure the networks and to identify the role of seed networks in maize agrobiodiversity conservation. We hypothesize that (1) at the community level, seed networks are less robust as communities have more accessibility to urban centers and their markets, and (2) at the household level, men and women will exchange with the same frequency and that, households that have bigger plots, more planting experience, sufficient maize to feed the family, and fewer members, will give seeds more often. Moreover, (3) households that give and receive more seeds will be the ones that produce more maize diversity on their plots.

Method

Study site

The study was conducted in nine communities (Acajete and Xico municipalities) of the Cofre de Perote region, in the center of Veracruz, Mexico. The study site is a mountainous highland region, and the studied communities range from 1739 to 2566 masl (INEGI, 2020; Table 1). The selected communities represent a gradient of accessibility (measured as transportation time) to urban areas, the cities of Coatepec, Xalapa, and Xico (Fig. 1). The most accessible community is located 25 minutes away from the nearest urban pole, while the least is 150 minutes away (Fig. 1). The communities that have more access to urban centers are also the largest, Xico Viejo, the most accessible community, has 138 households, and Buena Vista, the farthest, is comprised by 14

households (INEGI, 2020). Formal seed markets where households buy seeds are agribusiness stores in urban centers where they can also buy other supplies, such as fertilizers and pesticides.

In these communities, smallholder families produce *milpas* destined most often exclusively for their subsistence. According to our data, just 4.3% of households sell a small part of their production. Even though their grain supply depends on the *milpa*, it is frequent that the resulting harvest is not enough to meet all year's feeding needs, so they have to buy maize grain in the market (Negrete-Yankelevich et al., 2018).

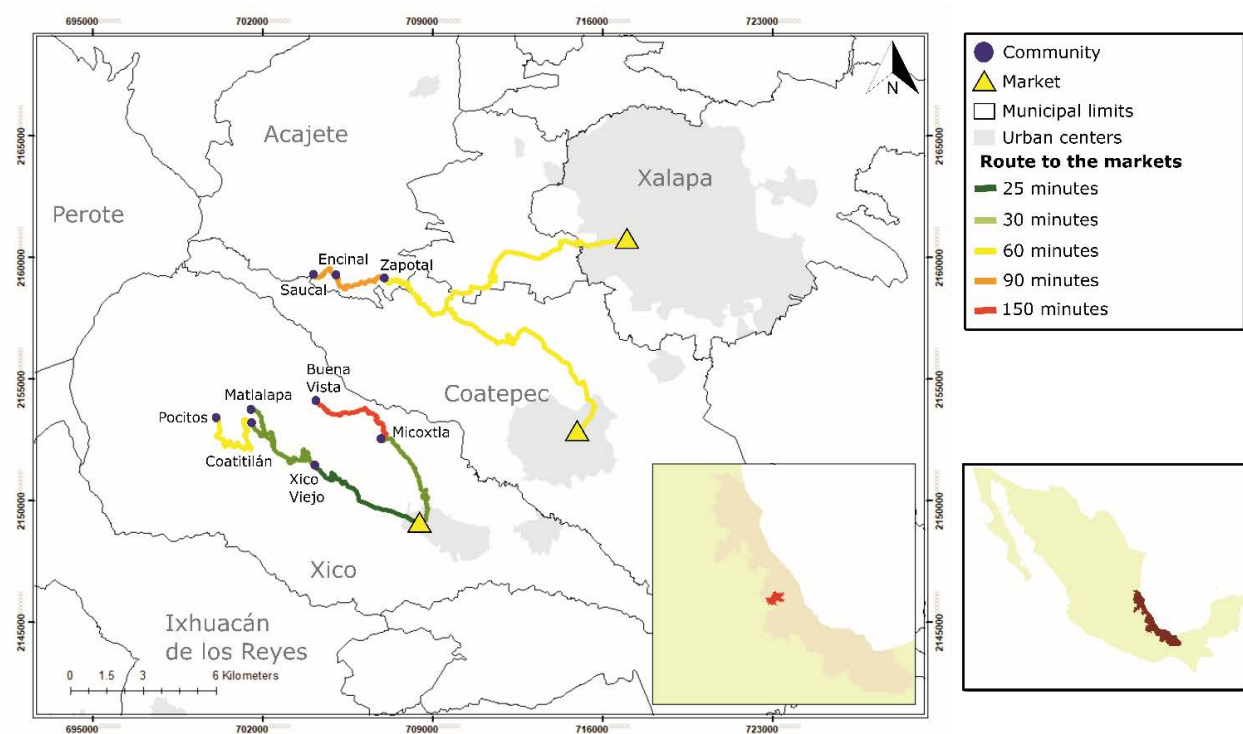


Fig 1. The nine study communities in the Cofre de Perote region and urban areas with seed markets. The route of each community to the more accessible urban center is colored according to self-reported transportation time. The location of the formal seed market is shown by the yellow triangles.

Surveys

We conducted surveys under a snowball sampling method, which consisted of two waves. In both waves, before starting the survey, we informed respondents what the study implied by reading aloud a pre-established explanation and asked people for their participation consent (supplementary

materials). We used protection equipment against COVID-19 and offered masks and hand sanitizer to participants. The first wave was carried out between December 2020 and April 2021. 165 surveys were conducted during organized meetings in the nine study communities. The meetings were organized in local community halls to invite farmers to participate in a larger project oriented to promote sustainable food security in rural areas. Each household of the first wave was asked to name every household with whom they had exchanged maize seeds during all the time they had been producing *milpa*. Later on, every household named included in the study communities was surveyed until no new names came up. With that we obtained 140 new surveys in the second wave, which was carried out between August 2021 and April 2022. Taking into consideration both waves 50% of the households of the studied communities were surveyed (Table 1). Of all surveys, 54.7% were answered by women. Morphotypes were designated according to local names because that is how households recognize them and exchange seeds. In addition to seed exchange questions, in both waves, we asked households 1) which maize morphotypes they cultivated, 2) how long they had been producing maize, 3) the size of their maize plot, 4) how many members the household had, 5) if the maize harvest of the last cropping season was sufficient to feed the family for the entire year, 6) if they had ever bought commercial maize seeds, and 7) the market in which they bought them. In addition, we went to the agribusiness stores and asked which maize hybrid varieties they sold. As this study is part of a larger project, validation of the information was done in posterior visits by participant observation.

Data analysis

Seed exchange networks were constructed under the SNA framework, in which households constitute nodes and exchanges are the network ties (Labeyrie et al., 2021). Networks were conceptualized at two scales, the regional level, in which all households of every community were considered, and the community level, in which only households of a particular community and the households of other communities that exchanged with them were considered.

Table 1. Characteristics of the study communities.

Community	Accessibility to urban centers (min)	Number of households ^a	Altitude ^a	Surveys
Xico Viejo	25	138	1740	44
Matlalapa	30	122	2086	56
Micoxtla	30	91	1739	42
Coatitlán	30	73	2029	37
Zapotál	60	41	2130	25
Pocitos	60	77	2441	50
Encinal	90	29	2428	20
Saucal	90	20	2566	20
Buena Vista	150	13	2160	10

^a National Institute of Statistics and Geography (INEGI, 2020).

During interviews, there were 114 reported exchanges with households that are not part of the studied communities, so we constructed open networks, in which all mentioned households were considered, and closed networks, in which exclusively households of the studied communities were included. In the surveys, 25 families mentioned they had exchanged but did not remember with whom they did, so we excluded 38 exchanges of this kind. We measured in-degree and out-degree centrality, which represent the number of times that a household has received and given seeds, and total centrality, as the sum of in-degree and out-degree. Density was measured, which expresses the ratio between the number of present exchanges (PE) by the number of possible exchanges (PoE) given the number of households on the network (PE/PoE) (Kolaczyk y Csárdi, 2014). Descriptive statistics and network visualization were made using **statnet** (Handcock et al., 2016) and **ggraph** (Pedersen, 2021) packages on RStudio 1.4.1103 and Cytoscape 3.9.0 software (Shannon et al., 2003).

Community scale

To estimate if the probability of buying seeds from the formal seed markets increases with the accessibility to urban centers, we adjusted a generalized linear mixed model with a binomial distribution, using maximum likelihood by the Laplace fitting method. The accessibility (distance in transportation time) of the community to urban centers was used as the fixed explanatory

variable. Direct distance was not used because the quality of roads and the available transportation means vary considerably between communities. The random variable was the community to which households belonged. The response variable was the presence or absence of seed acquisition in the market by households.

We conducted a robustness analysis of the open networks of each of the nine communities, which indicates the capability of the households to continue obtaining seeds from others even if other households progressively got out of the network. The robustness coefficient is a percentage that expresses the area under the curve of the number of households in the largest group of nodes that keep connected after households are progressively removed from the network, one by one (González-González et al., 2021; Kasthurirathna et al., 2013; Piraveenan et al., 2013). For more details on this estimate, see Piraveenan et al. (2013). Robustness was measured as:

$$\text{Ec. (1)} \quad R = \frac{A_O}{A_c} = \frac{200 \sum_{k=0}^R T_k - 100T_0}{R^2}$$

where A_O is the area under the curve of the observed network and A_c is the area under the curve of a complete network in which every node is connected to all nodes. T_k is the size of the largest component after k nodes have been removed. T_0 is the size of the largest component of the observed network before any node has been removed and R is the network size (number of nodes) (González-González et al., 2021; Kasthurirathna et al., 2013; Piraveenan et al., 2013). A network of any size in which all nodes are connected will have 100% robustness (Kasthurirathna et al., 2013). Node removal was done in two ways, randomly, and by degree, removing first the nodes that had the greatest degree centrality, so it could be seen if seed network robustness depended on the key households that exchanged more. For the random node removal, 200 randomly ordered lists of the nodes were generated. Degree removal was done following degree centrality. Robustness computation was carried out using NetworkX 2.5 package (Hagberg et al., 2008) on Python 3.9.6, following González-González et al. (2021). As the robustness coefficient is a percentage, a beta regression was used to model if the accessibility of the community to urban centers influences seed network robustness (Cribari-Neto & Zeileis, 2010; Douma & Weedon, 2019), using the **betareg** package (Cribari-Neto & Zeileis, 2010).

Household scale

To test if the probability of exchanging seeds depends on household characteristics, an Exponential Random Graph Model (ERGM) of social selection was used. This model estimates if the

characteristics of the nodes affect tie formation (Lusher et al., 2013). As we did not interview the households that are not part of the study site, and we do not know which are their characteristics, we used the regional closed network to adjust the model (Labeyrie et al., 2016). ERGM has the form:

$$\text{Ec. (2)} \quad P(X = x) = \frac{1}{k} \exp(\theta z(x) + \theta_a z_a(x, y))$$

Where X is the population of all possible networks and x denotes the observed network. The statistic $z(x)$ is a count of the number of times that a certain configuration appears on the graph x , θ is the estimated parameter to evaluate the probability of its occurrence (configurations 1 and 2 of Fig. 2), and k is a normalizing constant. The parameter θ_a is estimated through z_a statistic to estimate the interaction between network configurations (x) and household characteristics (y) (configurations 2 and 3 of Fig. 2) (Lusher et al., 2013).

The following is a description of the eight parameters estimated from the ERGM model. Two parameters of the form $\theta z(x)$ were estimated, the first one measures the probability of a seed exchange to occur, independently of the household's particular characteristics (configuration 1, Fig. 2), and the second one the probability of exchanges to be reciprocal (configuration 2, Fig. 2). Six parameters of the form $\theta_a z_a(x, y)$ were estimated. Configuration 3 of Fig. 2 was used to estimate the probability that two households of the same community exchange between them and the probability that there are exchanges between household members of the same gender. The other four parameters correspond to configuration 4 of Fig. 2., these parameters show the probability that a household gives seeds to others given the value for each of four characteristics the household has. The characteristics that we considered were 1) plot size, 2) number of years of production, 3) maize sufficiency, and 4) the number of household members. Model parameters were estimated using Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method and the convergence of the model was verified through multiple runs (Krivitsky et al., 2021). The goodness of fit of the model was tested to corroborate the reliability of the parameters, following the method of Koskien & Snijders (2013). The package **statnet** was used to adjust the model (Handcock et al., 2016).

It is expected that households produce more maize morphotypes if they exchange seeds with a lot of households. To test this, we used a generalized linear model (GLM) with a Poisson error distribution, and, the maximum likelihood by the Laplace method. The degree centrality of

each household was used as the explanatory variable (number of exchanges per household) and, the number of grown morphotypes was the response variable. To measure the degree centrality, the closed regional network was used. Statistical model simplification was performed using Akaike's Information Criteria (AIC). Only models with a minimum decrease of two AIC units with respect to the null model were considered plausible (Burnham & Anderson, 2002).



Fig 2. Configurations used to estimate the parameters of the exponential random graph model. They indicate the probability that 1) there is an exchange between any two households; 2) the exchanges are reciprocal; 3) an exchange occurs between two households with the same characteristic; 4) a household with a certain characteristic gives seeds to other households, no matter the characteristics of the others.

Results

Maize morphotypes and seed management

We found that households produced nine native morphotypes (Table 1) of the *Cónico* maize race (as previously reported by Leyva-Madrigal et al., 2020) and two hybrid varieties (elotero A-7573 and H-318 Bajío), which are both called *elotero* by farmers. Only six out of the nine native morphotypes were reported to be exchanged (*blanco*, *blanco angosto*, *negro*, *amarillo*, *pinto*, and *rojo*). Descriptive statistics of the household characteristics are shown in Table 1.

Table 2. Characteristics of the households in the study communities of the Cofre de Perote.

Community	Male exchanges (%)	Households with enough maize (%)	Number of household members ^a	Plot size (ha) ^a	Number of plots ^a	Age of production (median years)	Number of morphotypes ^a	Morphotypes per community ^b
Xico Viejo	0.7	0.28	5.5±2.7	1.1±1.1	1.1±0.5	20 – 50	2.2±0.8	R; B; N; A; P
Matlalapa	0.7	0.33	6.5±3.8	1.2±0.9	1.4±0.6	20 – 50	1.9±0.8	BA; BAN; B; N; A; P
Micoxtla	0.5	0.57	5.1±2.3	1.3±0.8	1.3±0.5	20 – 50	2.1±0.7	BA; B; N; A; P
Coatitlán	0.5	0.37	5.3±3.4	1.3±1.6	1.3±0.5	10 – 20	1.9±0.8	BG; BAN; B; N; A; P
Pocitos	0.7	0.54	6.2±3.1	1.1±0.8	1.4±0.6	20 – 50	1.9±0.9	BG; B; N; A; P
Zapotál	0.7	0.68	4.1±1.8	1.8±1.9	1.3±0.4	20 – 50	2.3±1.1	R, BA, NA; B; N; A; P
Encinal II	0.6	0.52	5.7±3.3	1.8±1.3	1.4±0.6	20 – 50	2.5±1.0	R, BA; B; N; A; P
Saucal	0.7	0.50	5.4±1.7	1.8±1.6	1.3±0.7	10 – 20	2.3±0.6	BG, BA; B; N; A; P
Buena Vista	0.7	0.20	6.3±2.6	1.1±0.6	1.4±0.5	10 – 20	2.4±0.6	BG; B; N; A; P

^a (Mean±SD; n=305)

^b B: *blanco*, N: *negro*, A: *amarillo*, and P: *pinto* morphotypes that are present in all communities. BA: *Blanco angosto*; BAN: *Blanco ancho*; BG: *Blanco grande*; R: *Rojo*; NA: *Negro angosto*

General characteristics of seed exchange networks

Of the 165 surveyed households on the first wave of interviews, 22 had not exchanged seeds, so they were not part of the network. Considering both waves, a total of 283 households constituted the closed regional network. The open network, in which all households of every community were included, was composed of 380 nodes and 726 exchanges. Of these, 316 households had received and 277 had given seeds. In total, there were exchanges between households belonging to 38 communities in seven municipalities (Fig. 3). The network was composed principally of *blanco* morphotype exchanges (52.7%), even though *amarillo* (20.2%) and *negro* (18.2%) were commonly exchanged too. *Pinto*, *rojo*, and *blanco angosto* were the least exchanged morphotypes (7.6%, 1.0%, 0.3%). Furthermore, almost all exchanges were made within the community, and only 23.69% of exchanges occurred between households of different communities (Fig. 4). There were some households in every community that exchanged notably more than others (Fig. 4). Exchanges took place mainly between households with some pre-existing relation, 64.9% were family members, 15.4% friends, and 17.8% acquaintances. Only 1.8% of the exchanges were carried out among households that did not report a pre-existing relationship. Households tended to provide and receive seeds free of charge, through gifts (49.5%) or exchanges (47.1%), and only 3.4% of exchanges were through monetary trade. The main reason to exchange was the lack of seeds (63.8%), but it was also common that households exchanged to test another morphotype (20.3%) or because they wanted to have bigger ears (19.8%) and/or healthier plants without plagues (8.6%). In all community networks, the average degree is between two and three exchanges per household, but densities differ, the least dense networks correspond to communities with more accessibility to urban centers. In addition, these networks are composed of a smaller proportion of the existing households (Table 2).

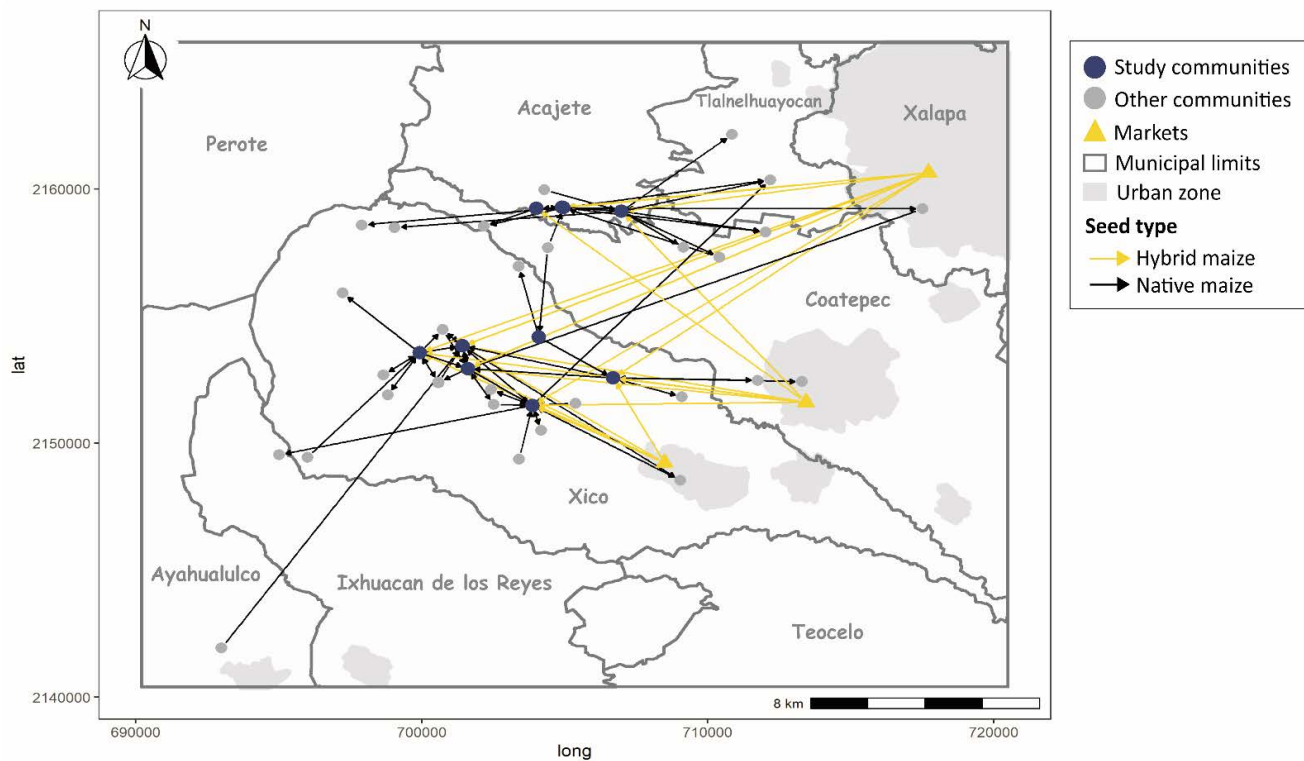


Fig 3. Regional seed exchange network. In this mountainous region, seed exchanges are given among communities that are close to each other, because maize morphotypes are extremely adapted to local conditions. Seeds are purchased in the three available markets regardless of distance.

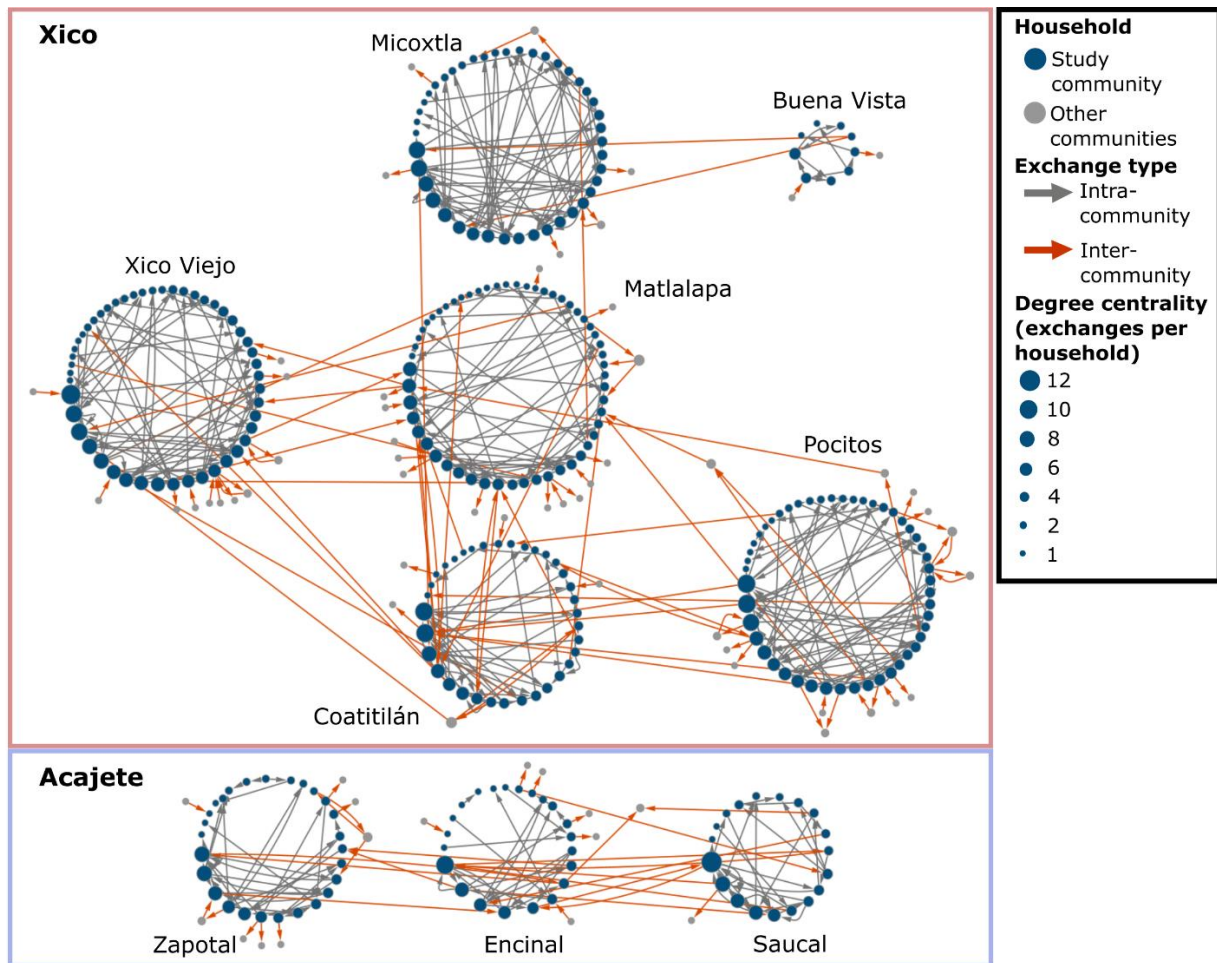


Fig 4. Seed exchange networks of native maize. Each group of households represents a community. The size of the node represents the number of times the household exchanged seeds (degree centrality).

Table 3. Characteristics of community seed exchange networks. All exchanges are included, so households of other communities are included as a node in a community network if there is an existing tie, which is expressed in the network size column. The number of households belonging to that particular community are expressed in the second column. The third column shows the percentage of households of the community that participate in the seed network (Households on the network/Households on the community).

Community	Network size	Households of the community	Proportion of households	Average degree centrality	Density (PE/PoE)
Regional	380	283	46%	3.86	0.005
Xico Viejo	70	52	37%	3	0.021
Matlalapa	86	58	47%	2.23	0.013
Micoxtla	52	45	49%	3.23	0.031
Coatitlán	57	38	52%	2.56	0.022
Pocitos	69	52	67%	3.10	0.022
Zapotál	39	27	65%	2.71	0.035
Encinal	39	23	79%	2.30	0.030
Saucal	26	20	100%	3.38	0.067
Buena Vista	13	11	84%	2.15	0.089

Seed network structure in relation to the accessibility of the community to urban centers

A total of 48 households bought commercial seeds, but most of them did it just once (64.6%) or twice (12.5%), and only few households bought seeds three times (6.2%). A minority of households bought seeds every year (16.6%) and they were all from communities between 25 and 30 minutes away from urban centers. A greater proportion of households purchased hybrid seeds in the communities that have more accessibility to urban centers (Fig. 5). The accessibility of the communities to the urban centers was related to a significant drop in the probability of households purchasing hybrid seeds (-0.02 log-odds decrease in purchase probability for every minute increase in transportation time; $z=-2.231$, Wald $p=0.02$, random effect variance 0.24, df 299).

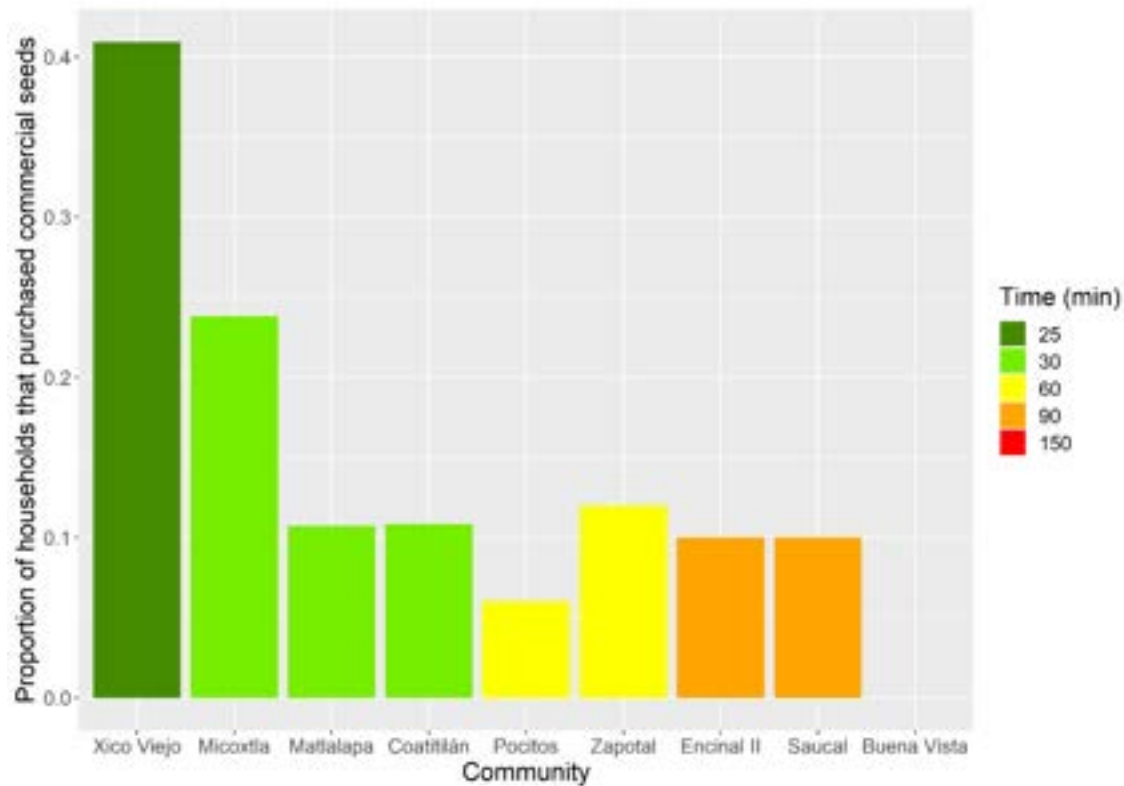


Fig 5. Proportion of households that purchased commercial seeds in each community. Bars are ordered according to the accessibility of the community to urban centers. In communities that have more access, more interviewed households had bought commercial seeds.

We found that, in general, networks were more robust to random removal of households than to degree removal (Fig. 6), due to the centralization of networks (Fig. 4), however, the difference between random and degree robustness is relatively small. The robustness of the networks is due to network density, in other words, no matter the size of the network or the number of households in the community, the number of exchanges per household is between two and three (Table 2), so in smaller communities, the network is denser. The accessibility to urban centers affected network robustness, both for random and degree removal (Fig. 6). If households of the farthest communities got out of the network, it would be easier for the households that remain to keep on obtaining seeds from other households, because they are connected to a greater proportion of the available households than the households of larger communities, that are the ones with more accessibility to urban centers.

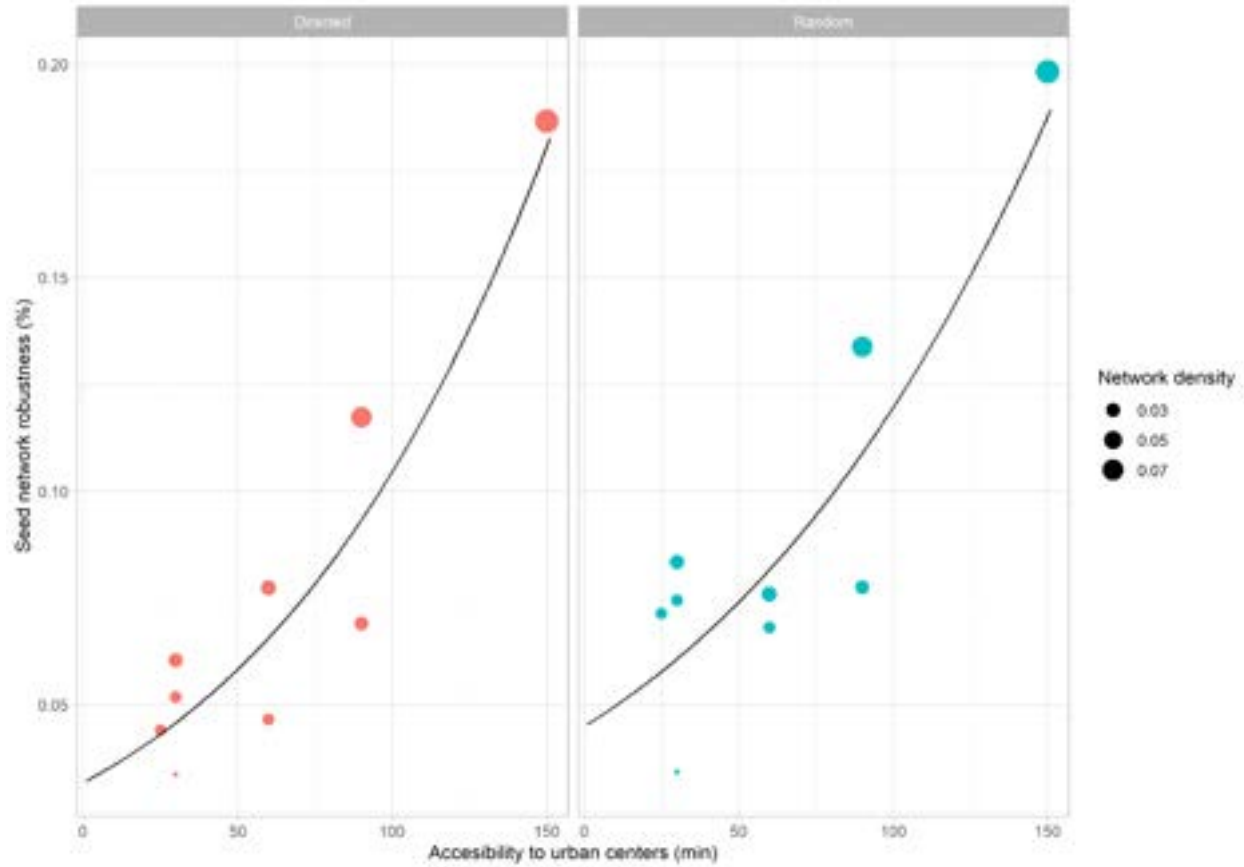


Fig 6. Robustness of the seed exchange networks. By (a) degree removal and (b) random removal. The lines represent the estimated beta regression model. For degree removal, 0.012 log-odds increase per minute increase in transportation time, $z=7.52$, $p=0.001$, pseudo $R^2=0.79$, $df=6$; for random removal, 0.010 log-odds increase in robustness measure per minute increase in transportation time $z=5.31$, $p=0.001$, pseudo- $R^2=0.64$, $df=6$.

The position of households in the network given their characteristics

According to ERGM, the probability of any two households of the regional network exchanging between them is very low (Table 3). This is caused by the null communication between the municipal networks of Xico and Acajete (Fig. 4), and by the fact that households exchange more probably with other households of their own communities with whom they have some pre-existing relationship. Reciprocal exchanges are more likely than exchanges in which one household only gives or receives seeds. Within-gender exchanges were more likely than between-gender and male exchanges were more frequent (Table 1). Households that have maize sufficiency for the year,

more years of production, bigger plots, and fewer members, are the ones that are more likely to give seeds to other households.

Table 4. Results of ERGM. Parameter estimates are expressed in log odds with standard deviation in parentheses (** $p \leq 0.01$, *** $p \leq 0.001$).

Terms	Null model	Complete model
Edges	-5.203(0.04)***	-8.351(0.27)***
Households of the same community		3.906(0.18)***
Reciprocal ties		2.907(0.17)***
Gender reciprocity		0.480(0.10)***
Probability of giving seeds		
Maize sufficiency for the cropping season		0.310(0.10)**
Years of production		0.127(0.04)**
Size of the plot		0.116(0.03)***
Number of household members		-0.045(0.01)**
AIC	5004	3471

Agrobiodiversity conservation through seed networks

Households with a greater degree centrality were more likely to produce a higher number of morphotypes on their plot. The number of exchanges made by the household had a significant positive effect on the number of produced morphotypes by the households (Fig. 7).

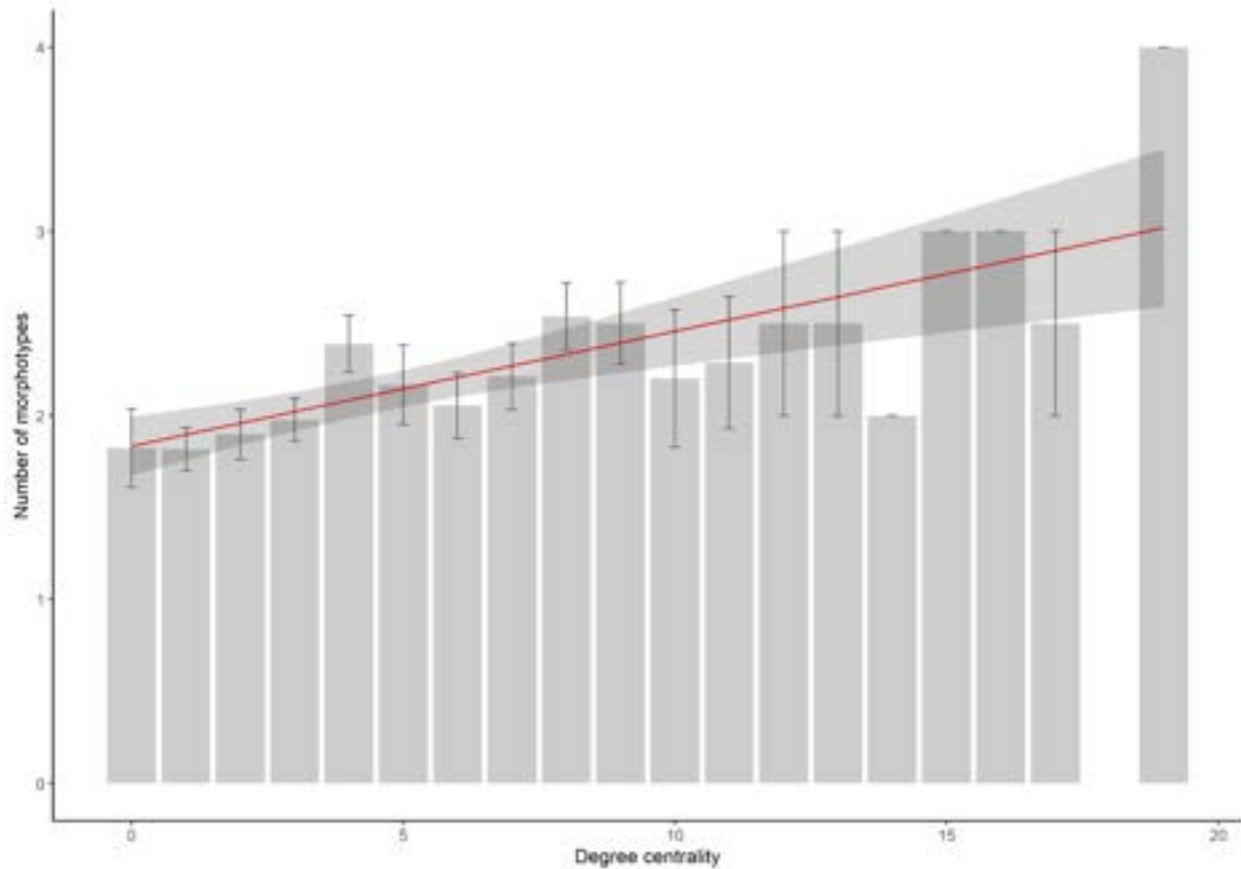


Fig 7. Number of morphotypes on the plot explained by the degree centrality of the households. Bars represent the mean number of maize morphotypes that each household produces, given its degree centrality ($\pm$ se). The red line represents the estimated model with the confidence interval (0.027 log-odds probability increase in morphotypes produced by household according to degree centrality increase, $t=4.26$ Wald p -value 0.01, random effect variance 0.004, df 286).

Discussion

The robustness of the networks and its relation to accessibility to urban centers

This study evaluated, under a quantitative approach, the factors that mold the structure of maize seed networks in a highland region. At the community level, seed network structure could be influenced by the accessibility of rural communities to urban centers, yet no study had quantitatively tested this. As hypothesized in this study, seed networks become less robust as communities' accessibility to urban centers increase. While the networks of the three communities farthest from cities were composed of almost all households in the communities, in the communities with more accessibility to urban centers, networks consisted of around half of the

existing households. In these communities, it may be that at the moment of the study, there were already some households that had left the network, or new households might have never joined it as new generations conformed, making it harder for households to get seeds through the network. As observed seed networks are not extremely centralized, therefore when the households that exchange more frequently are removed first, the decrease in robustness is similar to that observed when households are removed randomly. Consequently, network robustness is the result of the number of exchanges in the community, not necessarily the distribution of those exchanges.

Both the access to markets and the influence of urban centers on rural livelihoods could be causing the observed decrease in network robustness in relation to accessibility to urban centers. In this highland region, as in others, the use of commercial maize varieties is moderate (Brush & Perales, 2007; Dyer & López-Feldman, 2013), presumably because more genetic variability is needed to meet all environmental conditions, and commercial varieties sold on the available markets do not meet these necessities (Perales et al., 2003). Also, commercial seeds do not adjust to the purpose of the production of the households because the hybrid seeds sold on the region are destined for producing corn-cob for sale. Since households produce maize to have grain for self-consumption, and a competitive market of hybrids for grain production is absent, available hybrid varieties are not attractive. For these reasons, even though households have bought commercial seeds, most of them did it just once, and it was mentioned that when they realized that commercial seeds did not show good productivity results, they stopped buying them. Nevertheless, in the communities with more accessibility to cities, households have more access to corn-cob selling markets, so it is more feasible to buy this type of seeds and make a profit of its production. In this sense, the accessibility to cities is related to a market-oriented production, and the replacement of native for hybrid varieties could be related to this fact, as has been shown previously (McLean-Rodríguez et al., 2019). Market demand for fresh corn-cob is a reason for this replacement, because *Conico* maize races, turn into grain quickly. So, although formal and local seed systems coexist, as has been reported previously (Almekinders et al., 1994), the fact that there are less households on networks of the communities with more accessibility to urban centers could be related to the adoption of commercial varieties. Considering these results, formal systems could have a greater influence on the robustness of networks in midlands and lowlands, where commercial seeds are more common (Brush & Perales, 2007; Reyes-García et al., 2013). Furthermore, in this region, the dissemination of hybrid or native varieties through NGO and government agencies is unusual, in

contrast to other regions in which the dissemination of commercial varieties through them has been an effective strategy for the adoption of this kind of seeds, especially in communities that are more integrated into selling markets (Leyte et al., 2022).

Kinship relations are more frequent in rural communities that are not integrated into markets (Colleran, 2020), and, as in previous studies (Labeyrie et al., 2016), we found that seed networks are mostly based on them, therefore, this could be one of the reasons that networks are less robust on closer communities, because in the lack of kinship relations, exchanges are less common. Furthermore, in Mexico, smallholders are not necessarily abandoning subsistence maize because of market integration (Eakin et al., 2018), but engaging on off-farm activities in urban centers leads to a decrement on nutritional self-sufficiency (Novotny et al., 2021). Consequently, if fewer households of closer communities produce subsistence maize as their principal activity, and seed exchange practices become less frequent, seed networks get fragmented, losing their robustness. Therefore, the decrease in kinship relations and increase in engagement on off-farm labor are processes that are likely correlated with accessibility to urban centers and could be having an impact on network robustness. It would be important for further research to explore formally the role of these factors.

Household characteristics and its position on the network

In Latin America, newly formed households tend to have smaller plots (Lowder et al., 2016), thus, it is common that the harvest is not enough to meet the cropping season feeding necessities (Rivera-Núñez et al., 2022). In this context, seed networks could be fundamental to get seeds in case of scarcity. Moreover, male migration may be causing women to increasingly exchange seeds. It is unclear to what extent household sociodemographic characteristics could be molding maize seed networks. Here it was hypothesized that men and woman would exchange seeds with the same frequency and that households that had bigger plots, more planting experience, maize self-sufficiency, and fewer members would give seeds more often. We found that in all communities, a greater proportion of exchanges were made by men, and that there was a tendency of exchanges to be made between household members of the same gender. Contrary to our hypothesis, men keep on exchanging more frequently than women, so, even in the face of male migration (Deere, 2009), seed networks in this region continue to operate under the assumptions of classical peasant theory, which postulates that men are mostly in charge of production tasks (Chayanov, 1966).

Furthermore, we found that households with the hypothesized characteristics are the ones that more likely give seeds to others. These characteristics point to having surplus as the main precondition for households supplying seeds. The main reason for exchanging was the lack of seeds, thus, in this region, as in others (van Niekerk & Wynberg, 2017), seed networks work as seed banks that enable households to keep on sowing maize even if they did not have a great harvest the previous year. In other words, seed networks could be one of the factors that help households achieve food security through time, because, through seed networks, households in a vulnerable situation (having small plots, being young, having a higher number of household members, and not having sufficient maize for the cropping season), can get quality seeds adapted to the local conditions, and keep on producing maize. Current sociodemographic conditions in which newly formed households have smaller plots (Lowder et al., 2016), and find it hard to meet grain self-sufficiency because of off-farm labor (Novotny et al., 2021; Rivera-Núñez et al., 2022) are molding the way that maize seed networks are functioning. These networks could be a mechanism that helps households face the vulnerability, letting replenish seed supplies in case of shortage, however, this mechanism depends entirely on the persistence of households with seed surpluses.

Contrary to what has been reported for seed networks of the Peruvian Amazon (Abizaid et al., 2016), networks in this study tended to be reciprocal. This was because we considered lifetime exchanges, therefore some years households received, and others gave seeds to the same households. Reciprocity through time implies that when a household gives seeds to other that has lost that variety, the first household has the opportunity to get back seeds in the future in the case that seeds get lost (Violon et al., 2016), so this reciprocity through time helps achieve diversity conservation. There was an additional form of reciprocity not considered in our analysis, because it is not directly relevant for the conservation of local germplasm. It is common for a household that asks another for seeds, to give consumption maize, bought on local stores, in return. This form of reciprocity has been reported before (Badstue et al., 2006), but its role in sustaining seed networks has not been explored. This kind of reciprocity could become increasingly important to sustain seed networks as households engage on off-farm labor and do not have enough local seeds but have access to grain bought on local stores.

As in previous studies (Bellon et al., 2011; Llamas-Guzmán et al., 2022), it was more likely that exchanges occurred between households from the same community. In addition to the pre-

existing social relations given inside the community (Labeyrie et al., 2016) and the obvious practicality, the higher frequency of intra-community exchanges could be explained by the great diversity of environmental conditions within short distances that prevail in highland regions. Households cannot get seeds from a place that differs too much from the place where they cultivate, because maize is extremely adapted to specific environmental conditions (Perales et al., 2003). Consequently, maintaining maize genetic diversity in these conditions require seeds to move slowly and continuously through networks, in order for seeds getting adapted as they move through the landscape (Dyer & Taylor, 2008).

Agrobiodiversity conservation through seed networks

Highland maize native varieties are the most vulnerable to future conditions under climate change (Mercer & Perales, 2010). This is why the adequate functioning of seed networks and the diffusion of diverse varieties through them is especially important on these regions (Bellon et al., 2011). In other crops (Calvet-Mir et al., 2012; Llamas-Guzmán et al., 2022; Pautasso et al., 2012; Song et al., 2019), seed networks have been demonstrated to be important in diversity conservation. In Cofre de Perote, we hypothesized that households that had a greater centrality in the networks, sowed more maize morphotypes on their networks. This in fact happened, so households that give and receive seeds more frequently, can access and produce more diversity, playing a key role as maize diversity guardians. There are some regions of the world where this pattern does not occur because, there the families with more knowledge or prestige are the ones that exchange more frequently (Abizaid et al., 2016; Kawa et al., 2013; Thomas & Caillon, 2016). In Cofre de Perote, as in other regions, if farmers that have a great diversity got out of the networks, there would be varieties that would be lost (Llamas-Guzmán et al., 2022) and it would be harder for households that are lacking seeds to obtain them (van Niekerk & Wynberg, 2017). These households are particularly important for rare morphotypes to keep on existing, as they are the ones who can diffuse them. However, in all communities, there are three morphotypes that households did not exchange because there are only few households that produce those morphotypes (eight out of the 305 households plant one of those three non-exchanged morphotypes), so, the diffusion of these morphotypes through the network would be necessary for them to keep on existing. Furthermore, it is worth noticing that the number of morphotypes in the community is not necessarily related to the accessibility to urban centers, because, in the closest community, as well as in the farthest, there are five morphotypes and, in all communities, each household produces on average two

morphotypes, which could be an indicator that in this highland region, as in others (Perales et al., 2003), accessibility to urban centers is not having a negative impact on maize diversity.

Seed networks are endogenous processes to communities, enabling *in situ* maize diversity conservation, and, based on the findings of this study, it would be necessary to strengthen networks of communities that have more accessibility to urban centers. There are some methods in which this could be achieved, one of them is by promoting exchanges between households even though they do not have a kinship relation, by rising awareness of the importance of seed exchanging practices on meetings on the communities. Another way of strengthening seed networks is by providing key information of seed diffusion and maize participative improvement to the households that were identified as central on the network (Abay et al., 2011). In addition, seeds of the three morphotypes that are not exchanged, and the morphotypes that are not present on a given community could be given to them to promote the flow of those seeds through networks, as has been done before by Aw-Hassan et al. (2008) with barley seeds in Syria. It would be important for future research to document which is the reason why those morphotypes are not commonly sowed to evaluate which is the best strategy to diffuse those seeds.

Limitations

The networks represented in this study are a model of the exchanges that households have done throughout their life based on self-report. It is possible that our analysis is an underestimation as there might have been some exchanges that were not recalled. Moreover, networks are dynamic processes, and since we collapsed exchanges over time, there is more representativity of exchanges made by older households. In addition, the factors that model networks could have changed over time. Another limitation is that, as we defined maize morphotypes based on local classification, we could be over or underestimating maize diversity. However, the formalization conducted in this study enabled us to shed light over some socioeconomic and geographical patterns that can currently explain seed network structures.

Conclusion

At the community level, seed network robustness decreased with accessibility to urban centers. The presence of markets and changes in livelihood strategies in communities with easier access to urban life could be causing this pattern. Consequently, it would be necessary to concentrate efforts to strengthen networks in communities with more access to urban centers by promoting exchanges between households that are not already connected. Within communities, households that give

seeds more frequently are under conditions that enable them to save seeds for the next cropping season. Therefore, it would be necessary to promote politics and programs to improve food self-sufficiency of smallholder households. On a scenery where all households had enough maize to save seed for the next cropping season, seed networks would function to exchange seeds of different varieties. Maize seed networks in this highland region are functioning as sources of seeds in case of scarcity, thus contributing to food security. In addition, seed exchange frequency is related to maize morphotype diversity, and, in this sense, seed networks are useful for *in situ* crop diversity conservation. Knowledge and diffusion of the morphotypes that are rarely or never exchanged would be necessary for them to persist. Due to the heterogeneity of conditions of the highlands, the diffusion of the seeds through networks becomes especially important for them to keep on adapting to different conditions. This diffusion has to be slow to give place to adaptation. Sociodemographic conditions are molding networks at the community and the household level. In brief, seed networks are functioning to replenish seeds in case of scarcity and as an *in situ* conservation mechanism, so, the strengthening of these processes in communities that have more accessibility to urban centers is key for them to keep on performing their function.

SNA proved to be a powerful tool, as we were able to shed light on the factors that model seed networks and its usefulness for the persistence of rural livelihoods and native varieties. This formal approach could be used in different contexts worldwide in order to promote programs and politics that assure their persistence. The importance of seed networks for the continuity of crop diversity has been proven in multiple contexts, so it is necessary to develop informed strategies to promote crop diversity conservation in the face of the changing climatic conditions. In this study, we provide a novel approach to move in this direction.

Acknowledgments

The authors thank farmer families of the Cofre de Perote region, for kindly accepting to share the information for this research. This work is part of the Mano Vuelta project (CONACyT PRONAII-Socioecosistemas 319067). We acknowledge SENDAS A.C. for all the support provided in fieldwork. SLC thanks the graduate program “Maestría en Ciencias, Instituto de Ecología, A.C.” and CONACyT scholarship (1078607).

References

- Abay, F., de Boef, W., & Bjørnstad, Å. (2011). Network analysis of barley seed flows in Tigray, Ethiopia: Supporting the design of strategies that contribute to on-farm management of plant genetic resources. *Plant Genetic Resources*, 9(4), 495–505.
<https://doi.org/10.1017/S1479262111000773>
- Abizaid, C., Coomes, O. T., & Perrault-Archambault, M. (2016). Seed Sharing in Amazonian Indigenous Rain Forest Communities: A Social Network Analysis in three Achuar Villages, Peru. *Human Ecology*, 44(5), 577–594. <https://doi.org/10.1007/s10745-016-9852-7>
- Almekinders, C. J. M., Louwaars, N. P., & de Bruijn, G. H. (1994). Local seed systems and their importance for an improved seed supply in developing countries. *Euphytica*, 78(3), 207–216.
<https://doi.org/10.1007/BF00027519>
- Aw-Hassan, A., Mazid, A., & Salahieh, H. (2008). THE ROLE OF INFORMAL FARMER-TO-FARMER SEED DISTRIBUTION IN DIFFUSION OF NEW BARLEY VARIETIES IN SYRIA. *Experimental Agriculture*, 44(3), 413–431. <https://doi.org/10.1017/S001447970800642X>
- Badstue, L. B., Bellon, M. R., Berthaud, J., Juárez, X., Rosas, I. M., Solano, A. M., & Ramírez, A. (2006). Examining the Role of Collective Action in an Informal Seed System: A Case Study from the Central Valleys of Oaxaca, Mexico. *Human Ecology*, 34(2), 249–273.
<https://doi.org/10.1007/s10745-006-9016-2>
- Bellon, M. R., Hodson, D., & Hellin, J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(33), 13432–13437. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103373108>
- Bellon, M. R., Mastretta-Yanes, A., Ponce-Mendoza, A., Ortiz-Santa María, D., Oliveros-Galindo, O., Perales, H. R., Acevedo, F., & Sarukhán, J. (2021). Beyond subsistence: The aggregate contribution of campesinos to the supply and conservation of native maize across Mexico. *Food Security*, 13(1), 39–53. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01134-8>
- Bellon, M. R., Mastretta-Yanes, A., Ponce-Mendoza, A., Ortiz-Santamaría, D., Oliveros-Galindo, O., Perales, H., Acevedo, F., & Sarukhán, J. (2018). Evolutionary and food supply implications of ongoing maize domestication by Mexican *campesinos*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1885), 20181049. <https://doi.org/10.1098/rspb.2018.1049>
- Berlan, J. P., & Lewontin, R. C. (1986). The political economy of hybrid corn. *Monthly Review*, 38, 35–48.
- Boserup, E. (1965). *The conditions of agricultural growth*. Earthscan.
- Brush, S. B., & Perales, H. R. (2007). A maize landscape: Ethnicity and agro-biodiversity in Chiapas Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121(3), 211–221.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.018>
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). *Model selection and multi-model inference: A practical information-theoretic approach* (2nd ed.). Springer.
- Calvet-Mir, L., Calvet-Mir, M., Molina, J. L., & Reyes-García, V. (2012). Seed Exchange as an Agrobiodiversity Conservation Mechanism. A Case Study in Vall Fosca, Catalan Pyrenees, Iberian Peninsula. *Ecology and Society*, 17(1), art29. <https://doi.org/10.5751/ES-04682-170129>
- Chayanov, A. (1966). *The theory of peasant economy*. Richard Irwin for the American Economic Association.
- Colleran, H. (2020). Market integration reduces kin density in women's ego-networks in rural Poland. *Nature Communications*, 11(1), 266. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14158-2>
- Coomes, O. T., McGuire, S. J., Garine, E., Caillon, S., McKey, D., Demeulenaere, E., Jarvis, D., Aistara, G., Barnaud, A., Clouvel, P., Emperaire, L., Louafi, S., Martin, P., Massol, F., Pautasso, M., Violon, C., & Wencélius, J. (2015). Farmer seed networks make a limited contribution to agriculture? Four

- common misconceptions. *Food Policy*, 56, 41–50.
<https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.07.008>
- Cribari-Neto, F., & Zeileis, A. (2010). Beta Regression in R. *Journal of Statistical Software*, 34(2).
<https://doi.org/10.18637/jss.v034.i02>
- Deere, C. D. (Ed.). (2009). The Feminization of Agriculture? The Impact of Economic Restructuring in Rural Latin America. In *The gendered impacts of liberalization* (pp. 115–144). Routledge.
- Douma, J. C., & Weedon, J. T. (2019). Analysing continuous proportions in ecology and evolution: A practical introduction to beta and Dirichlet regression. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(9), 1412–1430. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13234>
- Dyer, G. A., & López-Feldman, A. (2013). Inexplicable or Simply Unexplained? The Management of Maize Seed in Mexico. *PLoS ONE*, 8(6), e68320. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0068320>
- Dyer, G. A., & Taylor, J. E. (2008). A crop population perspective on maize seed systems in Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(2), 470–475.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0706321105>
- Eakin, H., Sweeney, S., Lerner, A. M., Appendini, K., Perales, H. R., Steigerwald, D. G., Dewes, C. F., Davenport, F., & Bausch, J. C. (2018). Agricultural change and resilience: Agricultural policy, climate trends and market integration in the Mexican maize system. *Anthropocene*, 23, 43–52.
<https://doi.org/10.1016/j.ancene.2018.08.002>
- Fernández, R., Morales, L. A., & Gálvez, A. (2013). Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional. Una revisión indispensable. *Rev. Fitotec. Mex.*, 36, 275–283.
- González González, C., Van Cauwelaert, E. M., Boyer, D., Perfecto, I., Vandermeer, J., & Benítez, M. (2021). High-order interactions maintain or enhance structural robustness of a coffee agroecosystem network. *Ecological Complexity*. <https://doi.org/10.1101/2021.02.22.432328>
- Hagberg, A. A., Schult, D. A., & Swart, P. J. (2008). *Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX*. 5.
- Handcock, M., Hunter, D., Butts, C., Goodreau, S., Krivitsky, P., Bender-deMoll, S., & Morris, M. (2016). *statnet: Software Tools for the Statistical Analysis of Network Data*. (version 2016.9) [R package]. CRAN.R-project.org/package=statnet
- INEGI. (2020). *Censo Población y Vivienda 2020*. Microdatos.
<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos>
- Kasthurirathna, D., Piraveenan, M., & Thedchanamoorthy, G. (2013). On the Influence of Topological Characteristics on Robustness of Complex Networks. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 3(2), 89–100. <https://doi.org/10.2478/jaiscr-2014-0007>
- Kawa, N. C., McCarty, C., & Clement, C. R. (2013). Manioc Varietal Diversity, Social Networks, and Distribution Constraints in Rural Amazonia. *Current Anthropology*, 54(6), 764–770.
<https://doi.org/10.1086/673528>
- Khoury, C. K., Brush, S., Costich, D. E., Curry, H. A., Haan, S., Engels, J. M. M., Guarino, L., Hoban, S., Mercer, K. L., Miller, A. J., Nabhan, G. P., Perales, H. R., Richards, C., Riggins, C., & Thormann, I. (2022). Crop genetic erosion: Understanding and responding to loss of crop diversity. *New Phytologist*, 233(1), 84–118. <https://doi.org/10.1111/nph.17733>
- Kloppenborg, J. R. (2004). *First the seed: The political economy of plant biotechnology, 1492-2000* (2nd ed). University of Wisconsin Press.
- Kolaczyk, E. D., & Csárdi, G. (2014). *Statistical Analysis of Network Data with R* (Vol. 65). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0983-4>
- Koskien, J., & Snijders, T. (2013). Simulation, Estimation, and Goodness of Fit. In *Exponential Random Graph Models for Social Networks*. Cambridge University Press.

- Krivitsky, P., Morris, M., Handcock, M., Butts, C., Hunter, D., Goodreau, S., Klumb, C., & Bender de-Moll, S. (2021). *Exponential Random Graph Models (ERGMs) using statnet*. http://statnet.org/Workshops/ergm_tutorial.html
- Labeyrie, V., Antona, M., Baudry, J., Bazile, D., Bodin, Ö., Caillon, S., Leclerc, C., Le Page, C., Louafi, S., Mariel, J., Massol, F., & Thomas, M. (2021). Networking agrobiodiversity management to foster biodiversity-based agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00662-z>
- Labeyrie, V., Thomas, M., Muthamia, Z. K., & Leclerc, C. (2016). Seed exchange networks, ethnicity, and sorghum diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(1), 98–103. <https://doi.org/10.1073/pnas.1513238112>
- Lerner, A. M., & Appendini, K. (2011). Dimensions of Peri-Urban Maize Production in the Toluca-Atlacomulco Valley, Mexico. *Journal of Latin American Geography*, 10(2), 87–106. <https://doi.org/10.1353/lag.2011.0033>
- Leyte, J. D., Delaquis, E., Van Dung, P., & Douxchamps, S. (2022). Linking Up: The Role of Institutions and Farmers in Forage Seed Exchange Networks of Southeast Asia. *Human Ecology*, 50(1), 61–78. <https://doi.org/10.1007/s10745-021-00274-5>
- Leyva-Madrigal, Báez-Astorga, Negrete-Yankelevich, Núñez-de la Mora, Amescua-Villela, & Maldonado Mendoza. (2020). Maize genetic diversity in traditionally cultivated polycultures in an isolated rural community in Mexico: Implications for management and sustainability. *Plant Ecology & Diversity*, 15.
- Llamas-Guzmán, L. P., Lazos Chavero, E., Perales Rivera, H. R., & Casas, A. (2022). Seed Exchange Networks of Native Maize, Beans, and Squash in San Juan Ixtenco and San Luis Huamantla, Tlaxcala, Mexico. *Sustainability*, 14(7), 3779. <https://doi.org/10.3390/su14073779>
- Lotero-Velásquez, E., García-Frapolli, E., Blancas, J., Casas, A., & Martínez-Ballesté, A. (2022). Eco-Symbiotic Complementarity and Trading Networks of Natural Resources in Nahua Communities in Mountain Regions of Mexico. *Human Ecology*, 50(2). <https://doi.org/10.1007/s10745-022-00311-x>
- Louette, D., Charrier, A., & Berthaud, J. (1997). In Situ conservation of maize in Mexico: Genetic diversity and Maize seed management in a traditional community. *Economic Botany*, 51(1), 20–38. <https://doi.org/10.1007/BF02910401>
- Lowder, S. K., Skoet, J., & Raney, T. (2016). The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide. *World Development*, 87, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.10.041>
- Lusher, D., Koskien, J., & Robins, G. (2013). *Exponential Random Graph Models for Social Networks*. Cambridge University Press.
- McLean-Rodríguez, F. D., Camacho-Villa, T. C., Almekinders, C. J. M., Pè, M. E., Dell'Acqua, M., & Costich, D. E. (2019). The abandonment of maize landraces over the last 50 years in Morelos, Mexico: A tracing study using a multi-level perspective. *Agriculture and Human Values*, 36(4), 651–668. <https://doi.org/10.1007/s10460-019-09932-3>
- Mercer, K. L., & Perales, H. R. (2010). Evolutionary response of landraces to climate change in centers of crop diversity. *Evolutionary Applications*, 3(5–6), 480–493. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00137.x>
- Meyfroidt, P., Roy Chowdhury, R., de Bremond, A., Ellis, E. C., Erb, K.-H., Filatova, T., Garrett, R. D., Grove, J. M., Heinimann, A., Kuemmerle, T., Kull, C. A., Lambin, E. F., Landon, Y., le Polain de Waroux, Y., Messerli, P., Müller, D., Nielsen, J. Ø., Peterson, G. D., Rodríguez García, V., ... Verburg, P. H. (2018). Middle-range theories of land system change. *Global Environmental Change*, 53, 52–67. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.006>

- Negrete-Yankelevich, S., Porter-Bolland, L., Blanco-Rosas, J. L., & Barois, I. (2013). Historical Roots of the Spatial, Temporal, and Diversity Scales of Agricultural Decision-Making in Sierra de Santa Marta, Los Tuxtlas. *Environmental Management*, 52(1), 45–60. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0095-8>
- Negrete-Yankelevich, S., Portillo, I., Amescua-Villela, G., & Núñez-de la Mora, A. (2018). Proyecto DeMano. *Regions and Cohesion*, 8(2), 107–124.
- Novotny, I. P., Tittone, P., Fuentes-Ponce, M. H., López-Ridaura, S., & Rossing, W. A. H. (2021). The importance of the traditional milpa in food security and nutritional self-sufficiency in the highlands of Oaxaca, Mexico. *PLOS ONE*, 16(2), e0246281. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246281>
- Pacheco-Cobos, L., Grote, M. N., Kennett, D. J., & Winterhalder, B. (2015). Population and Environmental Correlates of Maize Yields in Mesoamerica: A Test of Boserup's Hypothesis in the Milpa. *Human Ecology*, 43(4), 559–576. <https://doi.org/10.1007/s10745-015-9771-z>
- Pautasso, M., Aistara, G., Barnaud, A., Caillon, S., Clouvel, P., Coomes, O., Delêtre, M., Demeulenaere, E., Santis, P., Döring, T., Eloy, L., Emperaire, L., Garine, E., Goldringer, I., Jarvis, D., Joly, H., Leclerc, C., Louafi, S., Martin, P., ... Tramontini, S. (2012). Seed exchange networks for agrobiodiversity conservation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 151–175. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0089-6>
- Pedersen, T. L. (2021). *ggraph: An Implementation of Grammar of Graphics for Graphs and Networks* (2.0.5). <https://CRAN.R-project.org/package=ggraph>
- Perales, H., Brush, S. B., & Qualset, C. O. (2003). Landraces of Maize in Central Mexico: An Altitudinal Transect. *Economic Botany*, 57(1), 7–20. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2003\)057\[0007:LOMICM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2003)057[0007:LOMICM]2.0.CO;2)
- Piperno, D. R. (2018). A model of agricultural origins. *Nature Human Behaviour*, 2(7), 446–447. <https://doi.org/10.1038/s41562-018-0390-8>
- 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. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(13), 5019–5024. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812525106>
- Piraveenan, M., Thedchanamoorthy, G., Uddin, S., & Chung, K. S. K. (2013). Quantifying topological robustness of networks under sustained targeted attacks. *Social Network Analysis and Mining*, 3(4), 939–952. <https://doi.org/10.1007/s13278-013-0118-8>
- Reyes-García, V., Molina, J., Calvet-Mir, L., Aceituno-Mata, L., Lastra, J. J., Ontillera, R., Parada, M., Pardo-de-Santayana, M., Rigat, M., Vallès, J., & Garnatje, T. (2013). “Tertius gaudens”: Germplasm exchange networks and agroecological knowledge among home gardeners in the Iberian Peninsula. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 9(1), 53. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-9-53>
- Ricciardi, V. (2015). Social seed networks: Identifying central farmers for equitable seed access. *Agricultural Systems*, 139, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.07.002>
- Rivera-Núñez, T., García-Barrios, L., Benítez, M., Rosell, J. A., García-Herrera, R., & Estrada-Lugo, E. (2022). Unravelling the Paradoxical Seasonal Food Scarcity in a Peasant Microregion of Mexico. *Sustainability*, 14(11), 6751. <https://doi.org/10.3390/su14116751>
- Scott, J., & Carrington, P. J. (Eds.). (2011). *The SAGE handbook of social network analysis*. SAGE Publ.
- Shannon, P., Markiel, A., Ozier, O., Baliga, N. S., Wang, J. T., Ramage, D., Amin, N., Schwikowski, B., & Ideker, T. (2003). Cytoscape: A Software Environment for Integrated Models of Biomolecular Interaction Networks. *Genome Research*, 13(11), 2498–2504. <https://doi.org/10.1101/gr.1239303>

- SIAP. (2007). *Situación actual y perspectivas del maíz en México 1996 –2012*. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. [http:// www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/ Integracion/EstadisticaDerivada/ComercioExterior/ Estudios/Perspectivas/maiz96-12.pdf](http://www.campomexicano.gob.mx/portal_siap/Integracion/EstadisticaDerivada/ComercioExterior/Estudios/Perspectivas/maiz96-12.pdf)
- Song, Y., Fang, Q., Jarvis, D., Bai, K., Liu, D., Feng, J., & Long, C. (2019). Network Analysis of Seed Flow, a Traditional Method for Conserving Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) Landraces in Liangshan, Southwest China. *Sustainability*, 11(16), 4263. <https://doi.org/10.3390/su11164263>
- Thomas, M., & Caillon, S. (2016). Effects of farmer social status and plant biocultural value on seed circulation networks in Vanuatu. *Ecology and Society*, 21(2), art13. <https://doi.org/10.5751/ES-08378-210213>
- van Niekerk, J., & Wynberg, R. (2017). Traditional seed and exchange systems cement social relations and provide a safety net: A case study from KwaZulu-Natal, South Africa. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1359738>
- Violon, C., Thomas, M., & Garine, E. (2016). Good year, bad year: Changing strategies, changing networks? A two-year study on seed acquisition in northern Cameroon. *Ecology and Society*, 21(2), art34. <https://doi.org/10.5751/ES-08376-210234>
- Zimmerer, K. S., de Haan, S., Jones, A. D., Creed-Kanashiro, H., Tello, M., Carrasco, M., Meza, K., Plasencia Amaya, F., Cruz-Garcia, G. S., Tubbeh, R., & Jiménez Olivencia, Y. (2019). The biodiversity of food and agriculture (Agrobiodiversity) in the anthropocene: Research advances and conceptual framework. *Anthropocene*, 25, 100192. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2019.100192>

DISCUSIÓN

Esta discusión se conforma por tres apartados. En el primero se hace un breve resumen de los resultados y una interpretación de los mismos, en el segundo se describen los posibles caminos para fortalecer las redes de semillas para que sigan cumpliendo su función tanto en la región del Cofre de Perote como en otras regiones, y el tercero es un artículo de divulgación que aborda las implicaciones de los resultados del estudio en relación con las políticas públicas actuales en materia de las semillas nativas o campesinas.

Resumen de los resultados

Los resultados de la presente investigación indican que las redes de semillas en la región de alta montaña del Cofre de Perote son moldeadas por algunas de las condiciones sociodemográficas que viven las familias campesinas que producen la milpa, tanto en la escala de comunidad como en el nivel de hogar. La accesibilidad de las comunidades a los centros urbanos y sus mercados está relacionada con la estructura de sus redes de intercambio, pues las redes de las comunidades que tienen mayor acceso de los centros urbanos están más fragmentadas porque las familias intercambian menos entre sí y hay menos familias de la comunidad que participan en la red que en las comunidades más alejadas y, por lo tanto, dichas redes son menos robustas. Esto podría estar relacionado con el cambio en los medios de vida derivado de la influencia de los centros urbanos porque, al dedicar cada vez más tiempo al trabajo en las ciudades, las prácticas tradicionales de manejo de las semillas podrían estar perdiéndose (Bellon et al., 2015; Eakin et al., 2018) y es posible cada vez menos familias estén sembrando cada año. Además, el acceso al mercado de semillas híbridas y de venta de elote podría estar haciendo que cada vez menos hogares siembren maíz nativo, como se ha visto en otras regiones (McLean-Rodríguez et al., 2019a) y de esta forma, dejan de intercambiar semillas a través de la red. Las semillas de maíz híbrido disponibles en los mercados de las ciudades están diseñadas para la producción de elote y no de grano, por tanto, su objetivo es la venta y no el auto-abasto durante el año. Pero la mayoría de los hogares siembran maíz para tener grano para autoconsumo durante el ciclo agrícola, entonces, los hogares de las comunidades con mayor accesibilidad a las ciudades, al tener también mayor acceso al mercado de ventas de elote, siembran más frecuentemente este tipo de maíz y dejan de pertenecer a la red, lo cual la hace cada vez menos robusta.

En el nivel de hogar, las familias que tienen más tiempo produciendo la milpa, que tienen terrenos grandes, que tuvieron suficiente maíz para todo el año en el último ciclo agrícola, y que tienen menos miembros en el hogar, son las que dan semillas con mayor frecuencia a los demás hogares. Es decir, las familias que tienen suficientes excedentes para guardar una parte de la cosecha para la siembra son los que dan semillas más frecuentemente. Esto quiere decir que las redes de semillas funcionan como bancos de semillas a través de los cuales los hogares pueden reabastecerse de semillas en caso de que les hagan falta, pues la principal razón para intercambiar fue la falta de semillas porque cosecharon poco maíz. Las redes de semillas en esta región están funcionando como uno de los factores que influyen en la seguridad alimentaria porque, aun cuando la milpa no es la única fuente de alimento, los hogares que tienen una situación vulnerable en la que les es difícil guardar las semillas de maíz para el siguiente ciclo agrícola, pueden reabastecerse de semillas de calidad adaptadas a las condiciones locales a un bajo costo o sin costo alguno y seguir sembrando la milpa el siguiente ciclo agrícola. Además de esto, en esta región de alta montaña, las redes de intercambio están relacionadas con la conservación de los maíces porque, entre más intercambios hace un hogar, es más probable que siembre más morfotipos en su parcela.

En resumen, igual que en otros sitios, las redes de semillas del Cofre de Perote funcionan como una de las bases para sostener la seguridad alimentaria rural (van Niekerk & Wynberg, 2017) y para la conservación de la diversidad de los cultivos (Calvet-Mir et al., 2012; Llamas-Guzmán et al., 2022; Song et al., 2019). La conservación de la diversidad de los cultivos es producto de las prácticas de manejo que hacen las familias y es a la vez necesaria para que puedan seguir con dichas prácticas, y así, las sigan conservando (Perales, 2016). Si los hogares no pudieran acceder a la diversidad de cultivos adecuada a las condiciones ecológicas de su región a través de las redes después de haber perdido sus semillas, entonces corren el riesgo de dejar de sembrar en ese ciclo agrícola o de dejar de sembrar por completo. En este sentido, la conservación *in situ* de los cultivos sirve para conservar los medios de vida de las familias campesinas. Las redes locales de semillas no necesariamente son una acción colectiva en la cual hay una organización establecida para el resguardo de las semillas (Badstue et al., 2006), los intercambios son más bien parte de la vida cotidiana de las familias y cuando intercambian, lo hacen con fines del uso más que con fines de conservación de la diversidad (Pautasso et al., 2012). Es decir, hay una relación de mutua dependencia entre el maíz y las familias que lo cultivan, pues para que el maíz se conserve, se necesita que las familias sigan sembrando e intercambiando semillas, y para que las familias

puedan seguir siendo campesinas, necesitan del maíz y de las redes de intercambio para poder abastecerse de él. El abandono al campo, la comercialización de la tierra y del trabajo, las situaciones climáticas extremas, las políticas públicas orientadas a la industrialización de la agricultura y la presencia del sistema formal de semillas bajo el modelo industrial son factores comunes de las zonas en las que la diversidad se ha perdido (Khoury et al., 2022; McLean-Rodríguez et al., 2019b) y todos estos factores tienen también un impacto en las formas de vida de las familias, sus redes de intercambio y posiblemente su seguridad y soberanía alimentaria.

Posibilidades de fortalecimiento de las redes

En todas las comunidades, sin importar su nivel de accesibilidad a los centros urbanos, las redes son importantes para reabastecerse de semillas en caso de que les hagan falta y para la conservación de los maíces. Sin embargo, también es cierto que, en las comunidades con mayor accesibilidad a los centros urbanos, las redes son menos robustas. Esto significa que es necesario que los hogares de estas comunidades intercambien más entre sí para que las redes no pierdan su función. Para lograr esto, se podrían llevar a cabo distintas acciones. El tamaño de la red covaría con la robustez, por lo tanto, es posible que las comunidades con más acceso a los centros urbanos estén creciendo, pero que las redes de semillas se estén manteniendo del mismo tamaño. Puede ser que una de las razones de que las redes no estén creciendo de la misma forma en que aumenta el número de hogares en la comunidad sea que los hogares están dejando de sembrar maíz, o que los nuevos que se conforman, se dediquen a otras actividades o que hayan empezado a sembrar maíz híbrido u otros cultivos. Una posible acción para robustecer las redes sería evaluar cuál es la situación de los hogares que no forman parte de las redes de las comunidades con mayor accesibilidad a los centros urbanos para saber si es posible que se incorporen a la misma. Además, se podrían organizar reuniones en las que se expongan las redes que se modelaron en este estudio y realizar un ejercicio en el que se muestre qué tan rápido colapsaría la red en caso de que los hogares fueran saliendo de ella uno a uno. Después de esto, de manera participativa, se podrían proponer intercambios entre hogares que no están conectados entre sí, o incluso que hogares que no están en la red entren a ella al hacer intercambios (en caso de que sigan sembrando maíz y que estén interesados en hacer intercambios), para que, de esta forma, las redes estén más conectadas y sea más fácil que todas las familias puedan acceder a semillas en caso de que les hagan falta o, para acceder a otros morfotipos de maíz que no poseen en este momento. Actualmente, los intercambios se hacen entre

familiares o amistades y como se ha visto que en las comunidades rurales que tienen mayor integración a los centros urbanos, las relaciones de parentesco son menos frecuentes (Colleran, 2020), esta podría ser otra razón por la que, en las comunidades con mayor accesibilidad a los centros urbanos las redes están más fragmentadas y hay menos hogares de la comunidad que son parte de la red. Entonces, en las reuniones, al discutir la importancia de las redes de semillas, sería posible acentuar la relevancia de que se hicieran intercambios entre personas que no necesariamente tienen una relación social preexistente. Si en estas reuniones se lograra visibilizar la importancia de las redes de intercambio y los hogares generaran nuevas conexiones entre sí, entonces las redes serían más robustas y podrían seguir cumpliendo su función aún ante las condiciones actuales que están influyendo en su funcionamiento.

Otro posible camino para el fortalecimiento de las redes es la difusión de las semillas de los tres morfotipos que no se intercambian a través de las redes (blanco ancho, blanco grande, negro angosto), y que son sembrados por muy pocos productores. También la difusión del maíz rojo que se intercambia y se siembra poco es relevante. Como primer paso, sería importante que en futuras investigaciones se evaluara cuál es la razón por la que estos maíces ya casi no se producen para así saber si es relevante que se difundan a través de la red. En caso de que su difusión sea relevante para los hogares, podría hacerse a través del trabajo con los hogares centrales, dando semillas de estos maíces si es que no los tienen, o en caso de que los tengan, brindando información acerca de la importancia de la difusión de estos maíces para que puedan seguir reproduciéndose en la región y, de esta forma, no se pierdan.

Además de estas dos acciones para el fortalecimiento interno de las redes, podría proponerse la creación de bancos comunitarios de semillas y de ferias de semillas, que han mostrado ser útiles en otras regiones del país (Llamas-Guzmán & Lazos Chavero, 2019), con el fin de que los maíces nativos se sigan conservando y no se pierdan las variedades que ya casi no se siembran. Los bancos comunitarios podrían ayudar también a que las familias que no están tan conectadas en las redes, pudieran acceder a semillas en caso de que les hicieran falta y así poder seguir sembrando, y asegurar la disponibilidad del grano para el ciclo agrícola. Sin embargo, estas dos estrategias, aun cuando han mostrado ser útiles, representarían un costo mucho mayor en términos monetarios y de trabajo, por lo cual, el fortalecimiento mismo de las redes podría resultar una estrategia más eficaz.

Las redes de semillas de maíz: un seguro ante las cambiantes condiciones de la actualidad

En la región de alta montaña del Cofre de Perote, las familias siembran maíz nativo para su autoconsumo cada año. Para esto, guardan una parte de su cosecha para la siembra del siguiente ciclo agrícola (Figura 1) o, les piden a otros hogares que les regalen o intercambien semillas y, es con estos intercambios que se forman redes de intercambio de semillas (Figura 2). La práctica de intercambio se ha hecho desde hace muchos años, pero, las condiciones actuales están influyendo en la manera en la que estas redes se estructuran.



Figura 1. Semillas almacenadas para la siembra del siguiente ciclo. Las familias escogen para sembrar las mazorcas más grandes con los granos de mayor tamaño, pero que tienen el olote delgadito, están libres de plagas y que tienen surcos rectos. La práctica de escoger mazorcas tomando en cuenta características de la planta se ha perdido en esta región. Después de elegir las mazorcas más bonitas, las desgranar y las guardan en un lugar distinto del maíz para comer. Generalmente se guardan en contenedores de plástico o de vidrio, para evitar las plagas y que sigan viables el siguiente ciclo agrícola.

Los cambios en la vida campesina que ponen en riesgo la integridad de las redes de semillas

En los últimos años, las comunidades rurales se han integrado a las dinámicas de los centros urbanos, de tal forma que diversifican sus labores hacia trabajos urbanos. Este proceso, por un lado, permite que el maíz se siga sembrando en las milpas, pues el trabajo en las ciudades genera ingresos para poder invertir en la siembra, pero, por otro lado, es común que al reducirse el tiempo que se le puede dedicar al cuidado de la milpa, las familias disminuyan el área de la siembra y la diversidad de cultivos que se incluye en la parcela, además de modificar las prácticas de manejo de las semillas. Al mismo tiempo, hay una tendencia a que los hogares jóvenes accedan a terrenos cada vez más pequeños y, por lo tanto, sus cosechas sean más escasas. Esto, en conjunto con de la degradación de los agroecosistemas, conduce a que la producción del maíz no sea suficiente para el consumo de la familia durante el ciclo agrícola.



Figura 2. Semillas de maíz negro y pinto. Las familias intercambian semillas principalmente con otras familias de su comunidad con las que tienen algún parentesco. La mayoría de las veces regalan las semillas o las cambian por otras semillas de maíces criollos locales, o por maíz en grano comprado en las tiendas, que no es sembrado en la comunidad y que generalmente es híbrido, el cual se usa para comer, pero no es útil para la siembra.

Estos procesos están influyendo en la manera en la que los hogares intercambian sus semillas, pues los hogares que tienen más tiempo sembrando maíz, que tienen terrenos grandes, con pocos integrantes y que producen suficiente maíz para el sustento de la familia durante todo el año, son los que dan semillas a los demás con mayor frecuencia, porque pueden guardar una parte de su cosecha para la siembra del siguiente ciclo (Figura 3). De esta forma, todos los hogares pueden tener semillas para la siembra, aun cuando no les haya sido posible guardar una parte de su cosecha para la siembra del siguiente ciclo. Las redes de semillas en la región del Cofre de Perote funcionan como bancos de semillas a través de los cuales los hogares pueden reabastecerse en caso de que lo necesiten y, en este sentido, representan uno de los factores que influyen en la seguridad alimentaria porque, al reabastecerse de semillas, las familias se aseguran de que podrán seguir sembrando maíz el siguiente ciclo y de que contarán con el grano para su alimentación. Las redes también tienen un papel en la conservación de la diversidad de los maíces nativos porque, al intercambiar, los hogares fomentan la dispersión de los distintos tipos de maíz y, por lo general, los que intercambian más frecuentemente son los que producen mayor diversidad en sus parcelas.



Figura 3. Trojas para almacenar el maíz. Las trojas son estructuras de madera en las que las familias guardan su cosecha de maíz del año, normalmente se encuentran a un lado de la casa. Las semillas son almacenadas en otro sitio, pues necesitan otro tipo de condiciones para poder ser viables el siguiente año.

Los hogares de las comunidades más cercanas a las ciudades y, por lo tanto, con mayor influencia de ellas, intercambian menos entre sí que los hogares de las comunidades con menos influencia, lo cual provoca que las redes se fragmenten (Figura 4). Aunque las redes de las comunidades con mayor acceso a los centros urbanos estén menos conectadas, siguen funcionando como uno de los factores que inciden en la seguridad alimentaria y en la conservación de la diversidad de los maíces. Es por esto por lo que sería importante que las familias de estas comunidades fortalecieran sus redes para que sigan cumpliendo con su función. Esto puede hacerse a través del fortalecimiento mismo de las redes, al discutir en reuniones sobre la importancia del intercambio de las semillas, o a través de otras estrategias como los bancos comunitarios de semillas o las ferias de semillas. Sin embargo, promover el intercambio de semillas entre las familias podría ser una estrategia mucho menos costosa y, al ser un proceso endógeno que ya está en curso, podría ser más exitosa y funcional para las familias.

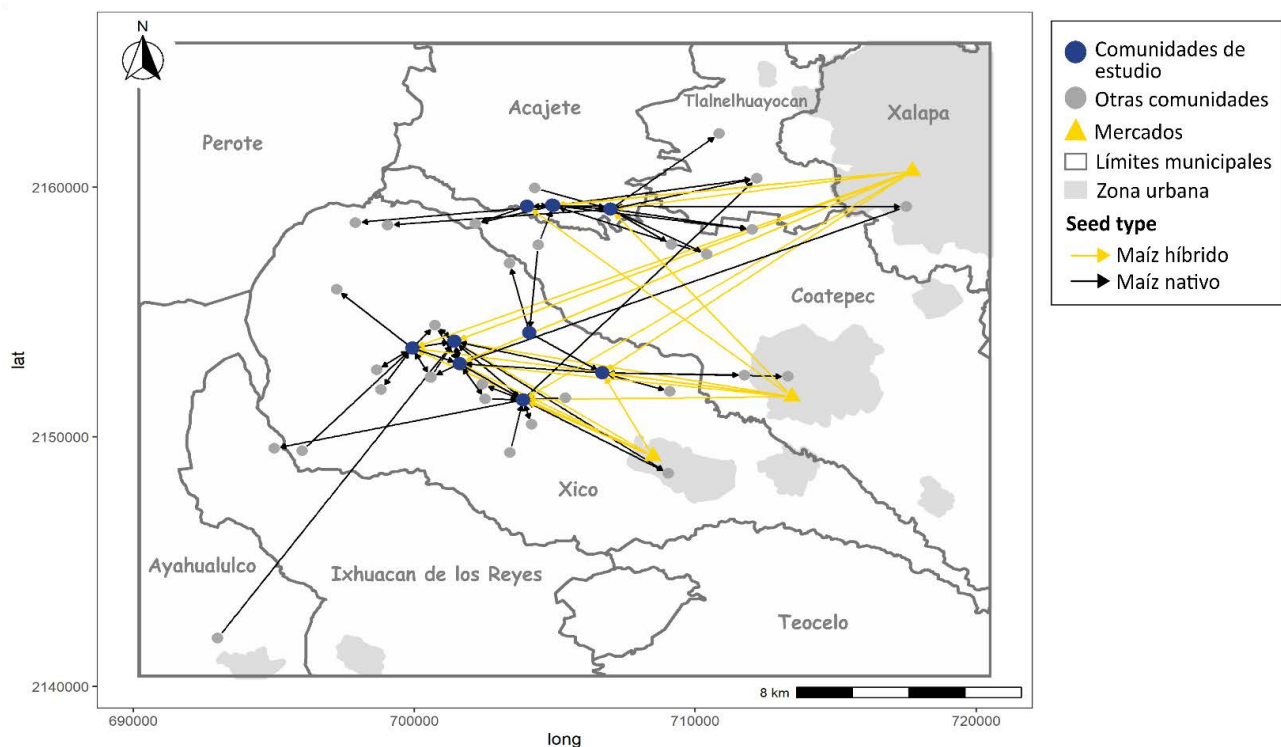


Figura 4. Mapa de la red regional de intercambio de semillas de maíz del Cofre de Perote. La red de intercambio generada a partir de los intercambios en nueve comunidades de estudio se extiende a través de 38 comunidades que pertenecen a siete municipios. Además de intercambiar semillas nativas, los hogares compran semillas en los mercados de los centros urbanos. Estas son semillas híbridas, que se tienen que comprar cada año en las tiendas agrícolas. Entre más accesibilidad tiene una comunidad a los centros urbanos, es más probable que los hogares compren semillas híbridas en el mercado. Esto influye en que las redes se fragmenten porque al comprarlas, dejan de intercambiar semillas nativas, o lo hacen menos frecuentemente.

Las presiones internacionales

Además de las condiciones sociodemográficas que están fragmentando las redes de intercambio, actualmente hay presiones internacionales por parte de las empresas semilleras en favor del avance de las semillas certificadas y las variedades comerciales registradas, tanto híbridas como transgénicas, a través de la Ley Federal de Variedades Vegetales, con la que se asumen a nivel nacional los compromisos del país con la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV). El incremento de estas variedades pone en riesgo a las redes de intercambio porque las semillas comerciales no pueden formar parte de las redes de semillas, ni ser almacenadas o vendidas, sin pagar por los derechos para hacerlo. México se incorporó a la UPOV en 1997 por ser una obligación adquirida al firmar el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994 y, desde ese entonces, hasta el momento de esta publicación, México está adherido al acta en su versión 78. Sin embargo, en las negociaciones comerciales internacionales del Tratado Integral y Progresista de Asociación Transpacífico (TIPAT) y después del Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC), se acordó como obligatorio que México se adhiera al acta de la UPOV en su versión 91 en los siguientes cuatro años desde su firma, los cuales se cumplen primero para TIPAC en noviembre de 2022. Esta versión, contrario a la versión 78, impide que los países pongan excepciones, como las actualmente aceptadas a la agricultura tradicional con las variedades de uso común y prácticas asociadas. Además, permite el registro de descubrimientos, variedades esencialmente derivadas y regula hasta la producción. La adherencia a la UPOV 91, restringiría el derecho de las familias a intercambiar semillas y en este sentido, se vulneraría la seguridad alimentaria rural y la conservación de la agrobiodiversidad,

incluido el maíz (Figura 5). El maíz, como las demás plantas que se polinizan por viento y por medio de polinizadores, podría fácilmente adquirir características genéticas, fisiológicas o metabólicas registradas como protegidas con derechos de obtentor y las personas podrían ser sancionadas por ello.

¿Por qué son importantes las redes de semillas para todo el mundo?

Las redes de semillas, además de ser importantes para las comunidades rurales, forman parte del sistema que mantiene el proceso de domesticación ya que, cuando un campesino ve que otra familia produce maíces con buenas características y le pide semillas, está promoviendo que esas características se queden en los maíces de las siguientes generaciones. Además, a través de las redes se pueden dispersar los maíces que tengan características adecuadas para las condiciones climáticamente cambiantes que se están viviendo hoy en día. Es por esto por lo que las redes de semillas son importantes para todas las personas que dependemos del maíz como base de nuestra alimentación. Por tanto, la protección de las semillas nativas y de las redes de intercambio de las familias campesinas es algo que nos concierne a todos.



Figura 5. Mazorcas seleccionadas por la familia para ser semilla en el siguiente ciclo agrícola. Son mazorcas de maíz blanco, amarillo y rojo. Si estas semillas dejaran de circular a través de las redes de intercambio, la diversidad de los maíces que están adaptados a los gustos de las familias y a las condiciones de alta montaña, podrían perderse. La difusión de las semillas diversas a través de las redes es primordial para la conservación de los maíces nativos.

Agradecimientos

A las familias milperas del Cofre de Perote, porque sin ellos, este trabajo no hubiera sido posible. Al proyecto Mano Vuelta, Biodiversidad en la milpa y su suelo: bases de la seguridad alimentaria de mujeres, adolescentes y niños rurales (Proyecto CONACYT PRONAI-Socioecosistemas 319067). A SENDAS, A.C. por el apoyo brindado en el trabajo de campo. SLC agradece al CONACYT por la beca de posgrado número 1078607.

Para saber más

- Bellon, M. R., Hodson, D., & Hellin, J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(33), 13432–13437.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1103373108>
- Llamas-Guzmán, L. P., Lazos Chavero, E., Perales Rivera, H. R., & Casas, A. (2022). Seed Exchange Networks of Native Maize, Beans, and Squash in San Juan Ixtenco and San Luis Huamantla, Tlaxcala, Mexico. *Sustainability*, 14(7), 3779.
<https://doi.org/10.3390/su14073779>
- Peña-Sanabria, K. A., Bracamontes Nájera, L., Benítez, M., Cremaschi, A., Jönsson, M., Acevedo, F., Tadeo-Robledo, M., Espinosa Calderón, A., Mora, K., Kleinfeld Ávila, T., Wegier, A., García Maning, G., Escalona Aguilar, M. A., García-Herrera, R., & Espinola, C. (2020). *Semillas para el bien común. Compendio de experiencias latinoamericanas y herramientas legales para su defensa en México*. Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología, UNAM.

Conclusión

A través del análisis de redes, pudimos probar la hipótesis de que, en las redes de intercambio de semillas de maíz en la Región del Cofre de Perote, los hogares que proveen semillas a los demás, son los que tienen características que les permiten guardar una parte de la cosecha para la siembra del siguiente ciclo agrícola. También probamos la hipótesis de que los hogares que intercambian más, son los que siembran más morfotipos de maíz en sus parcelas. Por tanto, las redes de semillas son uno de los factores que ayudan a lograr la seguridad alimentaria rural y la conservación de la diversidad de los maíces nativos. Además, probamos la hipótesis de que la accesibilidad de las comunidades a los centros urbanos afecta la estructura de las redes de semillas. Esto nos permitió explorar de qué manera las condiciones sociodemográficas actuales están moldeando las redes de intercambio de semillas de maíz.

La influencia que tienen los centros urbanos y sus mercados en los hogares podría hacer que, paulatinamente, los hogares dejen de intercambiar semillas de maíz nativo. Esto provocaría que sea cada vez más difícil para las familias acceder a semillas en caso de que les hagan falta, de que deseen tener otra variedad o necesiten maíces con características agronómicas más favorables. Esto tendría un impacto negativo en la seguridad alimentaria y en la conservación de las variedades nativas de maíz. Si las redes se fragmentaran hasta el punto en el que los hogares no pudieran acceder a semillas adecuadas para las condiciones ambientales de la región a través de los intercambios, este podría ser un factor de abandono al campo por falta del germoplasma. Es por esto por lo que el fortalecimiento de las redes de intercambio a través de acciones concretas como el intercambio de semillas entre hogares que no están conectados actualmente o la entrada a la red de hogares que no forman parte de ella, es de primera importancia. Esto podría lograrse en las comunidades del Cofre de Perote aquí estudiadas, a través del desarrollo de proyectos participativos que usen como base los resultados del presente estudio.

Las redes tienen un papel clave para el reabastecimiento de semillas en caso de que los hogares no puedan guardar semillas para el siguiente ciclo. Esto es factible en gran medida gracias a la disposición a donar semillas a otras familias por parte de los hogares que tienen terrenos grandes, más tiempo sembrando maíz, suficiente maíz para el sustento de la familia durante todo el ciclo agrícola, y pocos miembros en el hogar, y que, por lo tanto, tienen posibilidad de guardar semillas suficientes. También es factible gracias a la conciencia de los hogares más vulnerables de

que al dar semillas a otros hogares en un año de buena cosecha, aseguran la posibilidad de obtener semilla en años de escasez. Es así como las redes funcionan como uno de los mecanismos para la seguridad alimentaria rural. Pero, aunque los intercambios por falta de semillas son los más comunes, los hogares también intercambian para tener variedades que no tienen y para obtener en sus cultivos las características agronómicas favorables de las semillas que intercambian. Por esto, además de funcionar para la seguridad alimentaria, es a través de las redes que la diversidad de maíces se dispersa y, las familias que intercambian están promoviendo la conservación de la diversidad.

Referencias

- Badstue, L. B., Bellon, M. R., Berthaud, J., Juárez, X., Rosas, I. M., Solano, A. M., & Ramírez, A. (2006). Examining the Role of Collective Action in an Informal Seed System: A Case Study from the Central Valleys of Oaxaca, Mexico. *Human Ecology*, 34(2), 249–273. <https://doi.org/10.1007/s10745-006-9016-2>
- Bellon, M. R., Gotor, E., & Caracciolo, F. (2015). Conserving landraces and improving livelihoods: How to assess the success of on-farm conservation projects? *International Journal of Agricultural Sustainability*, 13(2), 167–182. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.986363>
- Calvet-Mir, L., Calvet-Mir, M., Molina, J. L., & Reyes-García, V. (2012). Seed Exchange as an Agrobiodiversity Conservation Mechanism. A Case Study in Vall Fosca, Catalan Pyrenees, Iberian Peninsula. *Ecology and Society*, 17(1), art29. <https://doi.org/10.5751/ES-04682-170129>
- Colleran, H. (2020). Market integration reduces kin density in women’s ego-networks in rural Poland. *Nature Communications*, 11(1), 266. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14158-2>
- Eakin, H., Sweeney, S., Lerner, A. M., Appendini, K., Perales, H. R., Steigerwald, D. G., Dewes, C. F., Davenport, F., & Bausch, J. C. (2018). Agricultural change and resilience: Agricultural policy, climate trends and market integration in the Mexican maize system. *Anthropocene*, 23, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2018.08.002>
- Khoury, C. K., Brush, S., Costich, D. E., Curry, H. A., Haan, S., Engels, J. M. M., Guarino, L., Hoban, S., Mercer, K. L., Miller, A. J., Nabhan, G. P., Perales, H. R., Richards, C., Riggins, C., & Thormann, I. (2022). Crop genetic erosion: Understanding and responding to loss of crop diversity. *New Phytologist*, 233(1), 84–118. <https://doi.org/10.1111/nph.17733>
- Llamas-Guzmán, L., & Lazos Chavero, E. (2019). Estrategias de conservación de las semillas por medio de ferias, bancos de semillas locales y agricultores custodios. In *MAREJADAS RURALES Y LUCHAS POR LA VIDA* (Vol. 1, pp. 165–184). AMER.
- Llamas-Guzmán, L. P., Lazos Chavero, E., Perales Rivera, H. R., & Casas, A. (2022). Seed Exchange Networks of Native Maize, Beans, and Squash in San Juan Ixtenco and San Luis Huamantla, Tlaxcala, Mexico. *Sustainability*, 14(7), 3779. <https://doi.org/10.3390/su14073779>

- McLean-Rodríguez, F. D., Camacho-Villa, T. C., Almekinders, C. J. M., Pè, M. E., Dell'Acqua, M., & Costich, D. E. (2019a). The abandonment of maize landraces over the last 50 years in Morelos, Mexico: A tracing study using a multi-level perspective. *Agriculture and Human Values*. <https://doi.org/10.1007/s10460-019-09932-3>
- McLean-Rodríguez, F. D., Camacho-Villa, T. C., Almekinders, C. J. M., Pè, M. E., Dell'Acqua, M., & Costich, D. E. (2019b). The abandonment of maize landraces over the last 50 years in Morelos, Mexico: A tracing study using a multi-level perspective. *Agriculture and Human Values*, 36(4), 651–668. <https://doi.org/10.1007/s10460-019-09932-3>
- Pautasso, M., Aistara, G., Barnaud, A., Caillon, S., Clouvel, P., Coomes, O., Delêtre, M., Demeulenaere, E., Santis, P., Döring, T., Eloy, L., Emperaire, L., Garine, E., Goldringer, I., Jarvis, D., Joly, H., Leclerc, C., Louafi, S., Martin, P., ... Tramontini, S. (2012). Seed exchange networks for agrobiodiversity conservation. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 151–175. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0089-6>
- Perales, H. R. (2016). Landrace Conservation of Maize in Mexico: An Evolutionary Breeding Interpretation. In N. Maxted, M. E. Dooloo, & B. V. Ford-Lloyd (Eds.), *Enhancing crop gene pool use: Capturing wild relative and landrace diversity for crop improvement*. CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780646138.0000>
- Song, Y., Fang, Q., Jarvis, D., Bai, K., Liu, D., Feng, J., & Long, C. (2019). Network Analysis of Seed Flow, a Traditional Method for Conserving Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) Landraces in Liangshan, Southwest China. *Sustainability*, 11(16), 4263. <https://doi.org/10.3390/su11164263>
- van Niekerk, J., & Wynberg, R. (2017). Traditional seed and exchange systems cement social relations and provide a safety net: A case study from KwaZulu-Natal, South Africa. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1359738>

Apéndice

Formato de encuesta a promotores



Proyecto Mano Vuelta
Proyecto: Biodiversidad en la milpa y su suelo: bases de la
seguridad alimentaria de mujeres, adolescentes y niños rurales
(PRONAR 315087, CONACYT).



ENTREVISTA

Fecha:

Nombre del entrevistado	Nombre del entrevistador
-------------------------	--------------------------

Esta entrevista es parte de un proyecto de investigación que se denomina DeMano y que realiza el Instituto de Ecología y La Universidad Veracruzana en la zona del Cofre de Perote. No se trata de ningún programa de gobierno y la información que usted nos proporcione se utilizará solamente para investigación, sin que se publique información personal en ningún momento ni forma. Sólo tendrá fines estadísticos. ¿Le parece bien que comencemos?	
Edad: Género: Comunidad:	
1. ¿Hay preescolar en la comunidad? ___ Si ___ No	2. ¿Hay primaria en la comunidad? ___ Si ___ No
3. ¿Hay secundaria en la comunidad? ___ Si ___ No	4. ¿Hay telebachillerato en la comunidad? ___ Si ___ No
5. ¿Hay centro comunitario de salud en la comunidad? ___ Si ___ No Lugar de la clínica de salud más cercana: Tiempo en transporte a la clínica de salud más cercana: Costo de pasaje sencillo a la clínica de salud más cercana:	6. Lugar del mercado donde se abastecen regularmente: Tiempo en transporte al mercado donde se abastecen regularmente:
7. ¿Los hombres/mujeres salen de la comunidad por trabajo? ___ Si ___ No	8. La ruta de transporte público más directa de la comunidad a la cabeza del municipio es: ___ Directa ___ Con un transbordo ___ Con dos transbordos ___ Con tres transbordos Costo del pasaje individual promedio de la comunidad a la cabeza del municipio: Tiempo necesario para llegar de la comunidad a la cabeza de municipio:
9. La ruta de transporte público más directa de la comunidad a la ciudad/ población grande más cercana es: ___ Directa ___ Con un transbordo ___ Con dos transbordos ___ Con tres transbordos Costo del pasaje individual promedio de la comunidad a la ciudad/ población grande más cercana: Tiempo necesario para llegar de la comunidad a la ciudad/ población grande más cercana:	10. Calidad de la infraestructura carretera: ___ Muy buena ___ Buena ___ Regular ___ Mala ___ Muy mala ¿Hay acceso a la comunidad todo el año? ___ Si ___ No

Formato de encuesta realizada a los productores



Proyecto Mano Vuelta
Proyecto: Biodiversidad en la milpa y su suelo: bases de la seguridad alimentaria de mujeres, adolescentes y niños rurales (PRONAI 319067, CONACYT).



ENTREVISTA

Flujo y criterios de selección de semilla en las distintas comunidades del Cofre de Perote.

Fecha:

Nombre del entrevistado	Nombre del entrevistador
-------------------------	--------------------------

Esta entrevista es parte de un proyecto de investigación que se denomina ~~De~~Mano y que realiza el Instituto de Ecología y La Universidad Veracruzana en la zona del Cofre de Perote. No se trata de ningún programa de gobierno y la información que usted nos proporcione se utilizará solamente para investigación, sin que se publique información personal en ningún momento ni forma. Sólo tendrá fines estadísticos. ¿Le parece bien que comencemos?

Edad: Género: Comunidad:

El maíz

1. ¿Cuántos tipos diferentes de maíz siembran? ¿Cómo se llaman estos maíces? (Proporción venta) 1. () 2. () 3. () 4. () ¿Alguno lo vende? Dígame por favor que proporción de cada uno es para venta y para consumo propio.	2. ¿Cuántas lonas salieron de este maíz el año pasado? 1. 2. 3. 4. ¿De qué tamaño son las lonas llenas (grandes de 50kg o pequeñas de 30kg)? ¿Le alcanzó el maíz para todo el año?
3. ¿Originalmente, de dónde provienen los maíces que siembran? 1. 2. 3. 4.	4. ¿Hace cuánto tiempo los empezaron a sembrar? 1. 2. 3. 4.
5. ¿En cuánta superficie y núm. De terrenos siembra cada maíz? 1. 2. 3. 4.	6. ¿Alguna vez ha sembrado o actualmente siembra algún maíz que no sea criollo, que venga de alguna empresa? Si es así, ¿Recuerda el nombre de ese maíz?

El intercambio de semillas de maíz

7. ¿Ha comprado semilla para sembrar en algún mercado? ¿En qué mercado y dónde está? ¿Qué tipo de semillas compró (ya sea que la identifiquen por color o nombre) ¿Qué tan frecuentemente lo hace?	8. ¿Alguna vez le ha dado semillas de maíz a otra persona? ¿Cuántas veces lo ha hecho? ¿O cada cuánto?
--	--



Proyecto Mano Vuelta
*Proyecto: Biodiversidad en la milpa y su suelo: bases de la
 seguridad alimentaria de mujeres, adolescentes y niños rurales*
(PRONAI 319067, CONACYT).



ENTREVISTA

Flujo y criterios de selección de semilla en las distintas comunidades del Cofre de Perote.

Fecha:

Nombre del entrevistado	Nombre del entrevistador
-------------------------	--------------------------

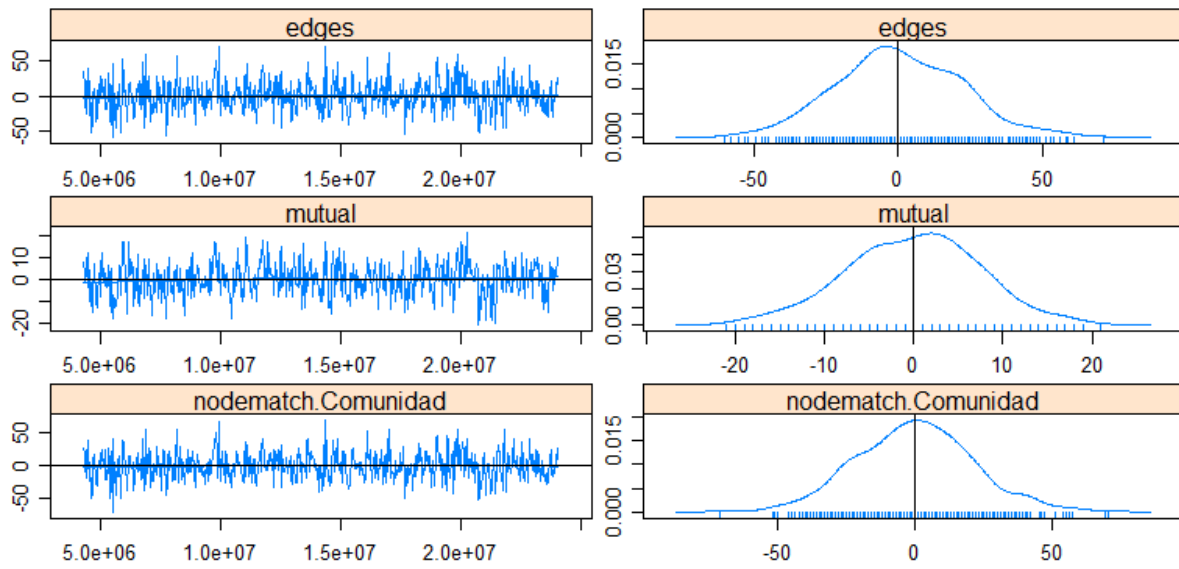
9. ¿Cuál es el nombre de la persona de la que recibió las semillas y a qué comunidad pertenece (me dice dónde vive para poderlo entrevistar)?	Cuando las dio, ¿las vendió, las regaló, fue intercambio, herencia u otra situación?	¿Qué variedades dio? Y ¿Cuántas mazorcas?		
①				
②				
③				
④				
10. ¿Alguna vez ha recibido semillas de maíz de otra persona?				
11. ¿Cuántas veces ha recibido semillas de otra persona?				
¿Cuál es el nombre de la persona de la que recibió las semillas y a qué comunidad pertenece?	Cuando las recibió, ¿las compró, se las regalaron, fue intercambio, herencia u otra situación?	¿Cuál fue la razón por la cual adquirió semillas (e.g. falta de semilla, da mazorcas más grandes, se enferma menos, por curiosidad)?	¿Sigue sembrando las variedades de las semillas que le proporcionó esa persona?	¿Qué variedades le dieron? Y ¿Cuántas mazorcas?
①				
②				
③				
④				

Pruebas de ajuste del ERGM

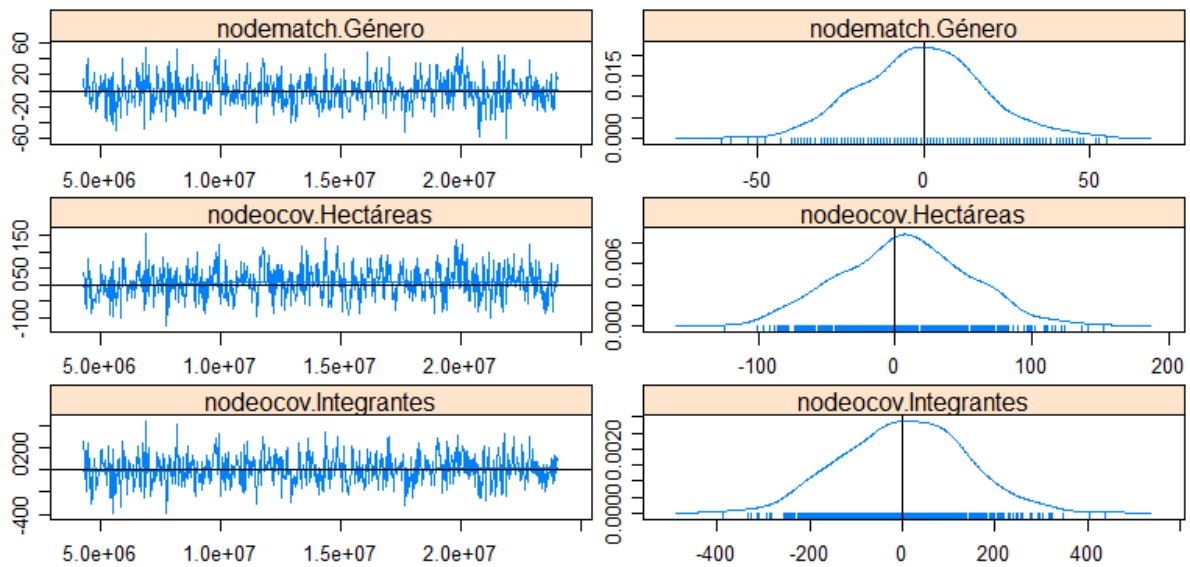
Convergencia de la estimación por el método de MCMC

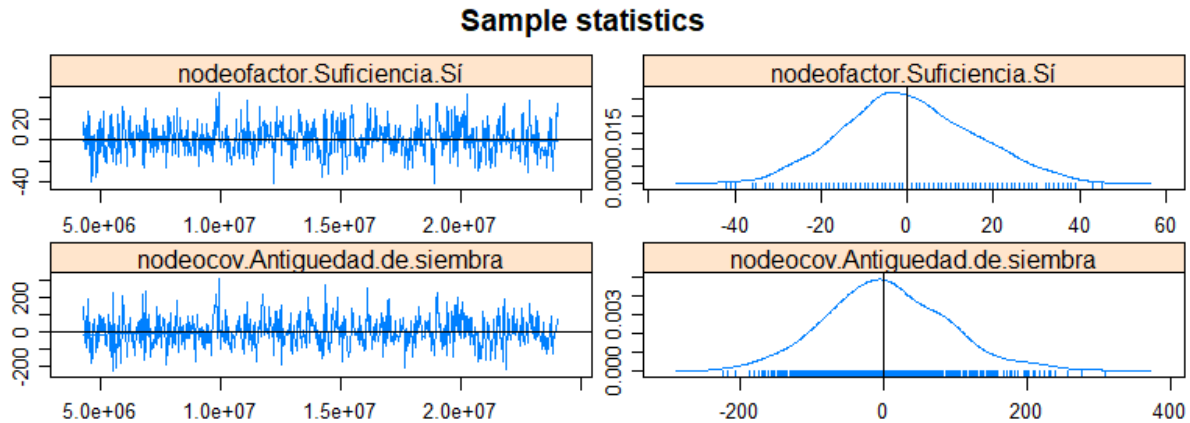
Cuando se incluyen parámetros de dependencia entre pares de nodos, por ejemplo, para estimar la probabilidad de que haya reciprocidad en los enlaces entre dos nodos, es necesario estimar los parámetros del ERGM por el método de MCMC. En el caso del ERGM estimado en esta tesis, debido a que se incluyó el parámetro de reciprocidad de intercambios de semillas, utilizamos el método MCMC como algoritmo de estimación. El algoritmo de estimación comienza su optimización con valores iniciales determinados para los parámetros, que se estiman utilizando el método *maximum pseudo-likelihood* (MPL). A partir de estos valores, se escoge un par de nodos al azar y se determina si habrá o no una conexión entre ellos dados los parámetros estimados previamente por el modelo con MPL, hasta generar una red con el mismo número de nodos y conexiones que la red observada. Este proceso se repite 1024 veces, generando así 1024 redes distintas utilizando los parámetros estimados en el modelo. En el último paso se calculan los estadísticos para todas las redes generadas y se comparan con la red observada. Cuando las redes generadas son muy diferentes a la red observada, el algoritmo cambia los valores de los parámetros y repite el mismo proceso hasta obtener la convergencia del modelo (hasta que la diferencia entre las redes generadas y la red observada sea suficientemente pequeña) (Krivitsky et al., 2021). En la siguiente figura se muestra que los valores de las redes generadas para los ocho parámetros estimados en el ERGM modelado en esta tesis rondan alrededor de los estadísticos de la red observada, es decir, la distribución está centrada en una diferencia de 0, por lo cual, el modelo convergió correctamente. Cada par de las gráficas representa la diferencia entre los valores de las redes generadas para cada parámetro y la red observada. El parámetro edges calcula la probabilidad de que haya una conexión entre cualquier par de nodos en la red. El parámetro mutual calcula la probabilidad de que los intercambios sean recíprocos. El parámetro nodematch.Comunidad calcula la probabilidad de que los intercambios sean entre hogares de la misma comunidad. El parámetro nodematch.Género calcula la probabilidad de que los intercambios sean entre miembros del hogar del mismo género. Los parámetros nodecov.Hectáreas, nodecov.Integrantes, nodefactor.Suficiencia.Sí, y nodecov.Antigüedad.de.siembra, calculan la probabilidad de que los hogares que tienen más hectáreas de siembra, menos integrantes, suficiente maíz para el sustento de la familia durante el ciclo agrícola y mayor antigüedad de siembra, sean los que dan semillas a los demás hogares.

Sample statistics



Sample statistics





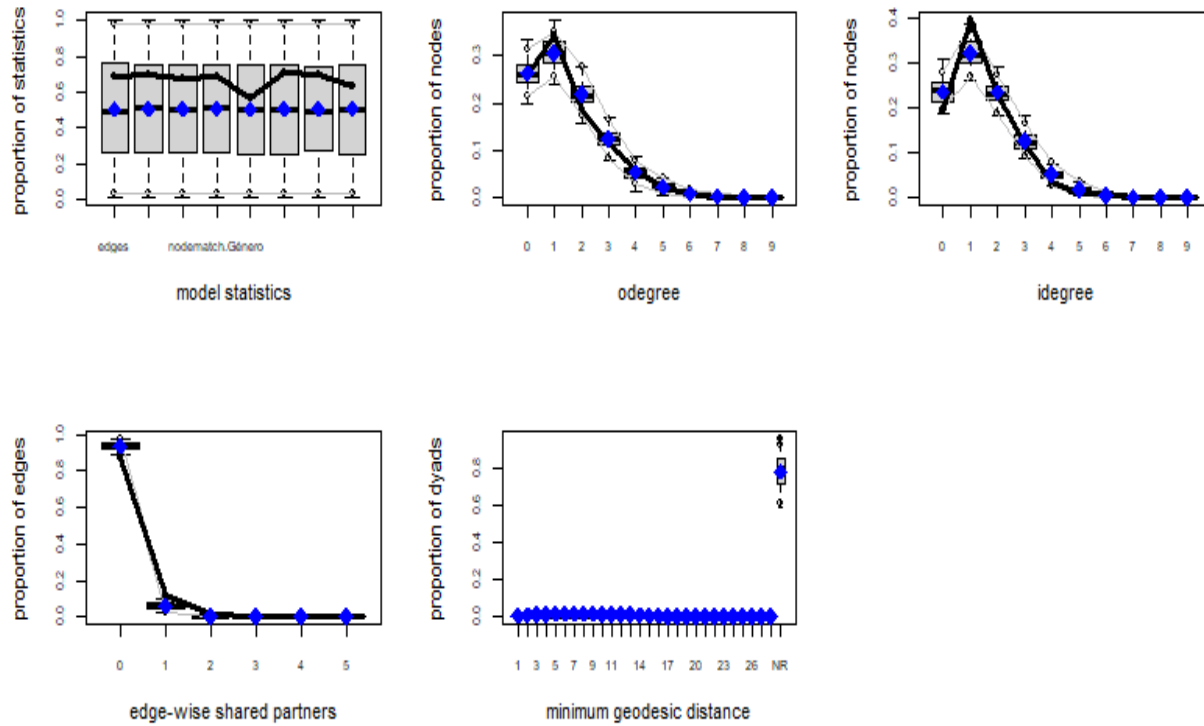
Convergencia del ERGM usando el algoritmo MCMC para la estimación de los parámetros.

Prueba de bondad de ajuste del ERGM

También es necesario hacer una prueba de bondad de ajuste para saber qué tan confiable son las estimaciones del modelo. En la siguiente figura se puede observar que los estadísticos de la red observada son muy cercanos a la distribución de las redes simuladas. Por lo tanto, la estimación de los parámetros del modelo es confiable. La primera gráfica representa la distribución de los estadísticos para los ocho parámetros estimados, 1) probabilidad de que haya un intercambio, 2) probabilidad de que sea recíproco, 3) que sea entre hogares de la misma comunidad, 4) que sean entre miembros del hogar del mismo género, que sean los hogares que tienen 5) más hectáreas, 6) menos integrantes, 7) suficiente maíz para el ciclo agrícola, 8) mayor antigüedad de siembra los que dan semillas. La gráfica de caja y bigotes representa la distribución de los valores para las redes generadas y la línea negra representa los valores de la red observada. En la siguiente gráfica en el eje de las x (odegree) se representa la centralidad de grado de salida (número de veces que un hogar dio semillas) y en el eje de las y la proporción de hogares que tienen esa centralidad. En la tercera gráfica en el eje de las x (idegree) se representa la centralidad de grado de entrada (número de veces que un hogar recibió semillas) y en el eje de las y la proporción de hogares que tienen esa centralidad. En la cuarta gráfica en el eje de las x (Edge-wise shared partners) se representa la proporción de hogares que intercambian semillas con exactamente los mismos hogares que otro hogar y en el eje de las y la proporción de conexiones compartidas. En la última gráfica, en el eje de las x (Minimum geodesic distance) se representa la distancia mínima geodésica, que se refiere a la distancia mínima entre cualquier par de hogares en la red. NR

representa el número de hogares que no podrían estar conectados de ninguna forma porque no hay ningún camino de intercambios en la red que los conecte. El eje de las y representa la proporción de par de hogares con dicha distancia geodésica mínima.

Goodness-of-fit diagnostics



Prueba de bondad de ajuste para el ERGM. Los estadísticos de la red observada son muy similares a los estadísticos de las redes generadas a partir de los parámetros estimados.