

# Agricultura y cambio climático

Alma Mendoza Ponce  
Guillermo N. Murray Tortarolo  
Ixchel M. Hernández Ochoa  
Carol Hernández Rodríguez



¿Qué sabemos del cambio climático en México?  
Colección dirigida por Francisco Estrada Porrúa



**PINCC**  
Programa de Investigación  
en Cambio Climático





# **Agricultura y cambio climático**

¿Qué sabemos del cambio climático en México?  
Colección dirigida por Francisco Estrada Porrúa



# **Agricultura y cambio climático**

Alma Mendoza Ponce  
Guillermo N. Murray Tortarolo  
Ixchel M. Hernández Ochoa  
Carol Hernández Rodríguez

¿Qué sabemos del cambio climático en México?  
Colección dirigida por Francisco Estrada Porrúa

Dewey  
631.585  
AG2781

LC  
S589.7  
AG2781

Agricultura y cambio climático / colección dirigida Francisco Estrada Porrúa ; colaboradores Alma Mendoza Ponce, Guillermo N. Murray Tortarolo, Ixchel M. Hernández Ochoa, Carol Hernández Rodríguez ; coordinación editorial Rubén Darío Martínez Ramírez ; edición Gerardo Mendiola Patiño ; corrección de estilo Samy Zacarías Reyes García, Marisol García Romero ; maquetación y diseño de portada Vanesa Gómez Vivas. -- 1ª. ed. -- Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Investigación en Cambio Climático, 2024.

1 recurso en línea (96 páginas) : il., tablas y figuras -- (¿Qué sabemos del cambio climático en México? ; v. 2)

ISBN colección: 978-607-30-8709-4

ISBN volumen: 978-607-30-9923-3

1. CAMBIO CLIMÁTICO-MÉXICO. 2. PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS-MÉXICO. 3. AGRICULTURA-MÉXICO. 4. CLIMATOLOGÍA AGRÍCOLA. 5. AGRICULTURA SUSTENTABLE. 5. CULTIVOS Y CLIMA.

Primera edición 2024

D. R.© Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, 04510 México, Ciudad de México

Programa de Investigación en Cambio Climático

Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio, sin la autorización escrita de su legítimo titular de derechos

ISBN colección: 978-607-30-8709-4

ISBN volumen: 978-607-30-9923-3

Impreso y hecho en México

Coordinación editorial: Rubén Darío Martínez Ramírez

Cuidado de edición: Gerardo Mendiola Patiño

Corrección de estilo: Samy Zacarías Reyes García y Marisol García Romero

Maquetación y diseño de portada: Vanesa Gómez Vivas



# ÍNDICE

- 9** Presentación
- 11** Introducción. Agricultura y cambio climático
- 19** Impactos del cambio climático en la producción de alimentos en México
- 37** Impacto del cambio climático y medidas de adaptación para la producción de trigo de riego y temporal en México
- 71** Semillas, agricultura y cambio climático en México



# Presentación

La generación, difusión y divulgación del conocimiento sobre los distintos aspectos del cambio climático son acciones fundamentales para mejorar nuestro entendimiento sobre el fenómeno, sus causas y consecuencias, así como para poder diseñar acciones de adaptación y mitigación adecuadas. Desde el 2021, el Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) de la UNAM inició el ciclo de conferencias y conversatorios “¿Qué sabemos del cambio climático en México?”. Este tipo de esfuerzos de largo aliento y enfocados son poco comunes en la difusión y divulgación del cambio climático en México, siendo que en cada mes del año se aborda a profundidad un tema en particular, con expertos con diversas trayectorias y provenientes de distintas disciplinas. Consideramos que la calidad de los ponentes y de la información presentada en cada uno de los módulos amerita la producción de la presente colección de fascículos temáticos que recoja, en palabras de los expertos participantes, las principales ideas y conclusiones presentadas en las exposiciones. Estos fascículos también tienen la función de vincular al lector de estos textos breves con las presentaciones completas en formato de video con las que se puede profundizar en los distintos temas. El objetivo principal del ciclo de conferencias y de estos volúmenes es dar a conocer la investigación en el tema que se desarrolla en la UNAM y en otras instituciones del país así como promover una visión multidisciplinaria e integral en cambio climático.

Este segundo ejemplar reúne tres textos referentes a temas abordados en el Módulo, Agricultura y cambio climático:

1. Impactos del cambio climático en la producción de

- alimentos en México presentado por el Dr. Guillermo N. Murray Tortarolo
2. Impacto del cambio climático y medidas de adaptación para la producción de trigo de riego y temporal en México presentado por la Dra. Ixchel M. Hernández Ochoa y colaboradores
  3. Semillas, agricultura y cambio climático en México por la Dra. Carol Hernández Rodríguez

Adicionalmente, este módulo contó con la presentación “Estrategias de CIMMYT para enfrentar los retos de adaptación y mitigación al cambio climático en la agricultura de México” presentado por el Dr. Iván Ortiz Monasterio que puede consultarse en línea a través del sitio web del PINCC.

Este volumen incluye una introducción de la Dra. Alma Mendoza Ponce quien fue la coordinadora del módulo y que nos ofrece una visión general de la agricultura y cambio climático en México, haciendo especial énfasis en los temas presentados en dicho módulo. La colección de textos se enriquece con un video del conversatorio final realizado con las y los panelistas participantes.

Este esfuerzo busca promover la generación de un mayor interés de la sociedad en la investigación que se realiza en México sobre cambio climático, y en particular la incorporación de las y los jóvenes en la discusión y generación de conocimiento en distintos aspectos del tema y desde la visión de distintas disciplinas.

Todos los módulos y publicaciones se pueden encontrar en la página del PINCC: <https://www.pincc.unam.mx/>

# Introducción

## ¿Qué sabemos del cambio climático en México? Agricultura y cambio climático

Alma Mendoza-Ponce<sup>1</sup>

México tiene 1,964,375 km<sup>2</sup> de territorio y de acuerdo con el Panorama Agroalimentario 2020 desarrollado por la Secretaría de Desarrollo (SADER & SIAP, 2020), el país tenía 246,000 km<sup>2</sup> dedicados a la agricultura sin contar al sector pecuario. Asimismo, se informa que de los 127.8 millones de mexicanos, 5.4 millones participan en actividades agrícolas, lo que representa que el 11.9% de la población económicamente activa esté en el sector primario. Existen cuatro cultivos que representan más del 36.0% del área cultivada del país y están estrechamente ligados a la dieta de los mexicanos: el maíz (24.5%), el sorgo grano (5.4%), el frijol (4.0%) y el trigo (2.0%).

El volumen de la producción agropecuaria del país hace que México sea el 12º productor mundial de alimentos y el 7º exportador. México exporta productos agroalimentarios principalmente a Estados Unidos y, en mucho menor grado y en orden descendente, a Japón, Canadá, China, entre otros. Los principales productos agroalimentarios que se exportan son la cerveza, el aguacate, las llamadas *berries* (zarcamoras, frambuesas, arándanos y fresas), el jitomate, el tequila, los pimientos y la carne de bovino (SADER & SIAP, 2020).

---

<sup>1</sup> Programa de Investigación en Cambio Climático, UNAM. Correo: [almamendoza@gmail.com](mailto:almamendoza@gmail.com)

La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) ha evaluado la vulnerabilidad, entendida como la susceptibilidad de las áreas agrícolas ante algún daño, ya sea natural o antrópico, a los cultivos mayormente producidos. Entre los cultivos que se distribuyen en las áreas de mayor vulnerabilidad están la cebada, el espárrago, el maíz grano, el maíz forrajero, el tomate verde y la avena forrajera.

Si bien el sector agropecuario es muy importante económicamente en el país, también impacta negativamente, puesto que degrada a los ecosistemas, a los suelos, además de emitir con ello gases de efecto invernadero. Es reconocido en el país y en el mundo que este sector es uno de los que tendrá los mayores impactos por el cambio climático.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su reporte publicado en febrero 2022 (IPCC, 2022), indica que, en varias áreas del mundo, la agricultura ya presenta estrés hídrico<sup>2</sup>, y que la situación se exacerbará en las áreas secas, y en países de bajos ingresos. Además, se tiene evidencia de que los cambios en la precipitación y en la temperatura impactaron negativamente los rendimientos medios mundiales del maíz, el trigo y la soja en un 4,1 %, 1,8 % y 4,5 %, respectivamente (Iizumi *et al.*, 2018). Sin embargo, estos impactos son heterogéneos; por ejemplo, entre 1910 y 2014, las condiciones agroclimáticas se volvieron más propicias para el crecimiento del rendimiento del maíz y la soja en el medio oeste de Estados Unidos, debido al aumento de las precipitaciones de verano y el enfriamiento, gracias al riego (Iizumi & Ramankutty, 2016; Mueller *et al.*, 2016). Asimismo, se ha reconocido que las sequías son uno de los principales impulsores de las reducciones de rendimiento a nivel mundial (Leng & Hall, 2019; Lesk, *et al.*, 2016; Meng *et al.*,

---

<sup>2</sup> "Se habla de estrés hídrico cuando la demanda de agua es más alta que la cantidad disponible durante un periodo determinado o cuando su uso se ve restringido por su baja calidad." Wikipedia

2016; Zipper *et al.*, 2016). De manera concreta se ha reportado que tres cuartas partes de las áreas cosechadas a nivel mundial (~454 millones de hectáreas) experimentaron pérdidas en los rendimientos agrícolas, por las sequías entre 1983 y 2009, lo que conllevó a una pérdida económica de US\$166 mil millones (Kim *et al.*, 2019).

Existen registros en el país que evidencian los efectos negativos de la falta de precipitación en la producción nacional de cultivos relevantes (maíz, caña de azúcar, papas, trigo, sorgo, cebollas, chile, calabazas, jitomates), y de pastizales en un 28 %, 12 % y 3 %, respectivamente (Murray-Tortarolo & Salgado, 2021). Además, es importante señalar que el 70 % de las tierras agrícolas de México son de temporal, es decir, dependen de la lluvia (SIAP, 2018), y que este sistema de producción se conforma de pequeños productores quienes se espera que sean altamente impactados por el cambio climático (Hannah *et al.*, 2017).

A pesar de la importancia del sector agrícola en México, es importante señalar que los estudios que han analizado los impactos del cambio climático en el sector aún son limitados, y sobre todo carecen de propuestas concretas que permitan priorizar áreas para el desarrollo de estrategias de adaptación. Estudios nacionales han modelado, principalmente, los impactos en los rendimientos o en las modificaciones del área de idoneidad climática del maíz (Gómez *et al.*, 2020; López-Blanco *et al.*, 2018; Murray-Tortarolo *et al.*, 2018; Ureta *et al.*, 2020, 2012), seguidos del trigo (Gómez Díaz *et al.*, 2020; Hernandez-Ochoa *et al.*, 2019), la caña de azúcar (Baez-Gonzalez *et al.*, 2018), y el sorgo (Gómez *et al.*, 2020), frijol (Cerdeira-Hurtado *et al.*, 2017).

Estos estudios son relevantes para visualizar impactos generales del cambio climático en el sector agrícola en México; sin embargo, estos análisis deberán ir más allá de la identificación de reducciones de idoneidad climática y de reducciones de rendimiento a escalas gruesas,

ya que el país necesita incluir datos locales de variedades agrícolas y de rendimientos reales que permitan monitorear las modificaciones en fenología, tiempos de siembra, cantidad de riego y fertilizantes, con el fin de dirigir estrategias específicas a municipios o localidades prioritarias para implementar estrategias locales que maximicen la adaptación al cambio climático.



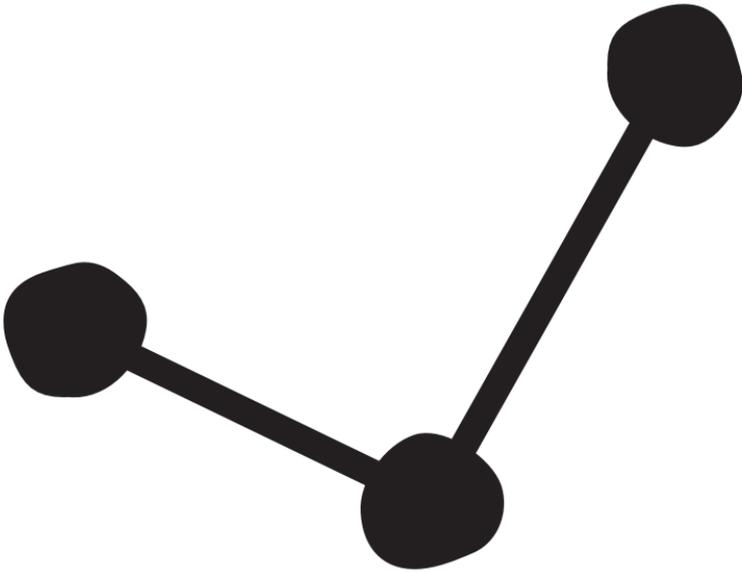
## Referencias

- Baez-Gonzalez, A. D., Kiniry, J. R., Meki, M. N., Williams, J. R., Alvarez Cilva, M., Ramos Gonzalez, J. L., & Magallanes Estala, A. (2018). Potential impact of future climate change on sugarcane under dryland conditions in Mexico. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 204(5), 515-528. <http://dx.doi.org/10.1111/jac.12278>
- Cerda-Hurtado, M. I., Hernández-Delgado, S., Reyes-Valdés, H., Mayek-Pérez, N., González-Prieto, J., Manuel, E. O. C. C. O. T. P., & DISTRIBUTION OF WILD LIMA BEAN (*Phaseolus lunatus* L., F. (2017). Effect of Climate Change on the potential distribution of wild lima Bean (*Phaseolus lunatus* L., Fabacea). *Publications from USDAARS / UNL Faculty*. 1714, <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2744&context=usdaarsfacpub>.
- Gómez Díaz, J. D., Flores Velázquez, R., & Monterroso Riva, A. I. (2020). Aptitud actual bajo escenarios de cambio climático para tres cultivos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 777-788. <http://dx.doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2463>
- Gómez, J., Flores, R., & Monterroso, A. (2020). Aptitud actual bajo escenarios de cambio climático para tres cultivos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(4), 777-788. <http://dx.doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2463>
- Hannah, L., Donatti, C., Harvey, C., Alfaro, E., Rodriguez, D. A., Bouroncle, C., Castellanos, E., Diaz, F., Fung, E., Hidalgo, H. G., Imbach, P., Läderach, P., Landrum, J. P. & Solano, A. (2017). Regional modeling of climate change impacts on smallholder agriculture and ecosystems in Central America. *Climatic Change*, 141(1), 29-45. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-016-1867-y>
- Hernandez-Ochoa, I. M., Luz Pequeno, D. N., Reynolds, M., Babar, M. A., Sonder, K., Molero Milan, A., Hoogenboom, G., Robertson, R., Gerber,

- S., Rowland, D. L., Fraisse, C. W., & Asseng, S. (2019). Adapting irrigated and rainfed wheat to climate change in semi-arid environments: Management, breeding options and land use change. *European Journal of Agronomy*, 109, 125915. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125915>
- Iizumi, T., & Ramankutty, N. (2016). Changes in yield variability of major crops for 1981–2010 explained by climate change. *Environmental Research Letters*, 11(3), 034003. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034003>
- Iizumi, T., Shiogama, H., Imada, Y., Hanasaki, N., Takikawa, H., & Nishimori, M. (2018). Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981–2010 compared with preindustrial levels. *International Journal of Climatology*, 38. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.5818>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change In Press*. Retrieved from Cambridge
- Kim, W., Iizumi, T., & Nishimori, M. (2019). Global Patterns of Crop Production Losses Associated with Droughts from 1983 to 2009. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(6), 1233–1244. <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0174.1>
- Leng, G., & Hall, J. (2019). Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future. *Science of The Total Environment*, 654, 811–821. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.434>
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84–87. <http://dx.doi.org/10.1038/nature16467>
- López-Blanco, J., Pérez-Damián, J. L., Conde-Álvarez, A. C., Gómez-Díaz, J. D., & Monterroso-Rivas, A. I. (2018). Land suitability levels for rainfed maize under current conditions and climate change projections in Mexico. *Outlook on Agriculture*, 47(3), 181–191. <http://dx.doi.org/10.1002/oa.1646>

[org/10.1177/0030727018794973](https://doi.org/10.1177/0030727018794973)

- Meng, Q., Chen, X., Lobell, D. B., Cui, Z., Zhang, Y., Yang, H., & Zhang, F. (2016). Growing sensitivity of maize to water scarcity under climate change. *Scientific Reports*, 6(1), 19605. <http://dx.doi.org/10.1038/srep19605>
- Mueller, N. D., Butler, E. E., McKinnon, K. A., Rhines, A., Tingley, M., Holbrook, N. M., & Huybers, P. (2016). Cooling of US Midwest summer temperature extremes from cropland intensification. *Nature Climate Change*, 6(3), 317-322. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2825>
- Murray-Tortarolo, G., J. Jaramillo, V., & Larsen, J. (2018). Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico (Vol. 253).
- Murray-Tortarolo, G. N., & Salgado, M. M. (2021). Drought as a driver of Mexico-US migration. *Climatic Change*, 164(3), 48. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-021-03030-2>
- SADER, & SIAP. (2020). Panorama Agroalimentario 2020. Retrieved from México: SIAP. (2018). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Retrieved 13-02-2018, from Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Social, Pesca y Alimentación (SAGARPA) <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-pecuaria>
- 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>
- Ureta, C., Martínez-Meyer, E., Perales, H. R., & Álvarez-Buylla, E. R. (2012). Projecting the effects of climate change on the distribution of maize races and their wild relatives in Mexico. *Global Change Biology*, 18(3), 1073-1082. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02607.x>
- Zipper, S. C., Qiu, J., & Kucharik, C. J. (2016). Drought effects on US maize and soybean production: spatiotemporal patterns and historical changes. *Environmental Research Letters*, 11(9), 094021. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094021>



**"...existen tres grandes motores de la variación climática planetaria: la radición solar, el albedo y la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre".**

# 01.

## Impactos del cambio climático en la producción de alimentos en México

Guillermo N. Murray Tortarolo<sup>1</sup>

### El cambio climático actual: motores, consecuencias e impactos

Los seres humanos a través de nuestras actividades modificamos distintos componentes del sistema Tierra y la empujamos a los límites de su funcionamiento, y muchas veces fuera de estos (Gaffney & Steffen, 2017). Por ejemplo, hemos disminuido drásticamente la diversidad biológica, duplicado la cantidad de nitrógeno reactivo que circula globalmente y creado sustancias químicas contaminantes sin precedentes en la historia planetaria (Rockström *et al.*, 2009). Dentro de estas alteraciones, también hemos modificado el clima planetario, en el denominado cambio climático antropogénico.

En ese sentido, existen tres grandes motores de la variación climática planetaria: la radiación solar, el albedo y la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre (Murray-Tortarolo, 2022). Los seres humanos hemos alterado el último componente,

---

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad. UNAM, campus Morelia. Correo: [gmurray@iies.unam.mx](mailto:gmurray@iies.unam.mx)

a través de la quema de combustibles fósiles y la deforestación. Mediante dichas actividades, hemos casi duplicado la concentración de dióxido de carbono y triplicado la de metano, en los últimos 150 años, principales gases de efecto invernadero (Friedlingstein *et al.*, 2020). La consecuencia ha sido un aumento medible e indudable en la temperatura global, acompañado de una redistribución de los patrones de precipitación, el derretimiento de los casquetes polares, un aumento en la intensidad de los huracanes, por mencionar solo algunas (Allan *et al.*, 2021).

A raíz de lo anterior se han dado diversos impactos para los ecosistemas y los seres humanos. En términos de los primeros, se ha registrado una pérdida de biodiversidad, desde los genes hasta las poblaciones (Scheffers *et al.*, 2016), un aumento en la mortalidad vegetal, particularmente en los bosques de coníferas del hemisferio norte (Bell *et al.*, 2020); una mayor incidencia de incendios forestales (Moritz *et al.*, 2012) y una pérdida de organismos en los océanos a causa de la acidificación de estos (Doney *et al.*, 2009).

Para los seres humanos, el cambio climático ha significado una expansión en las enfermedades tropicales (Lafferty, 2009), un incremento en las pérdidas materiales asociadas a fenómenos extremos (p. ej. huracanes) más recurrentes e intensos (Estrada *et al.*, 2015), aumento en las tasas de mortalidad debidas a olas de calor (Bouchama *et al.*, 2007), y una disminución global en el rendimiento de algunos cultivos, sobre todo cereales —aunque el patrón es sumamente variable dependiendo de la latitud y el cultivo en sí—, (Rosenzweig, 2014).

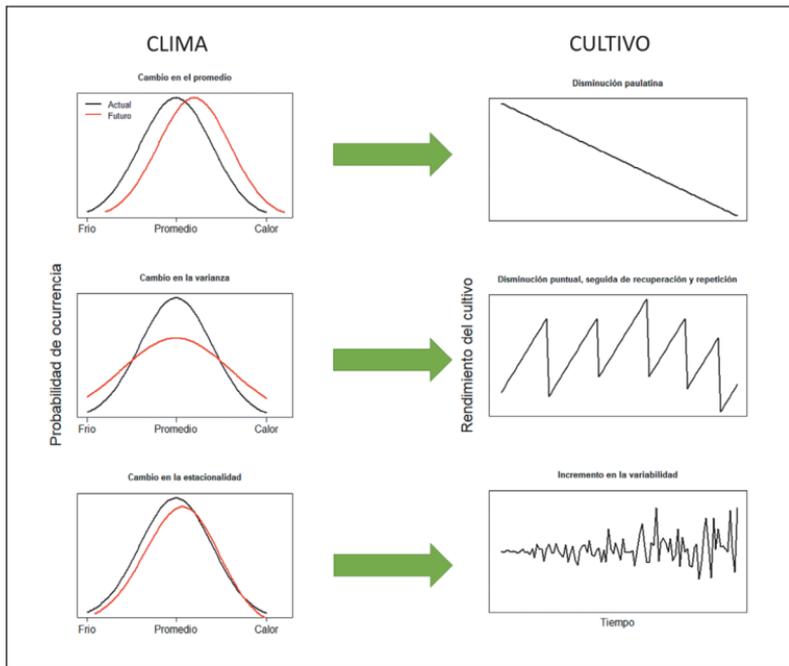
Sobre este último impacto, las consecuencias del cambio climático en la producción agrícola, se centra el presente capítulo. En el mismo se explican los impactos que el cambio climático ha tenido y tendrá sobre la producción de alimentos en el contexto global y nacional en México. Para ello se mencionan y sintetizan algunos de

los trabajos recientes más relevantes en el tema a través de un modelo general de impactos del cambio climático basado en tres posibles cambios: medias, extremos y simetría.

## **El cambio climático y la producción de alimentos**

El cambio climático tiene tres formas mediante las cuales puede impactar en la producción de alimentos: 1) un cambio en las medias históricas climáticas (también denominado tendencias), por ejemplo, un aumento térmico de largo plazo; 2) un aumento en la frecuencia de los eventos climáticos extremos (variabilidad), por ejemplo, en sequías u ondas de calor; y 3) un cambio en la estacionalidad (simetría) climática, por ejemplo, como un retraso de la época de lluvias (IPCC, 2013; véase **Figura 1**). Cada una de estas formas de cambio se presenta en horizontes temporales y escalas espaciales distintas, con impactos diferenciales para la producción de alimentos, como se describe a continuación.

El primer tipo de cambio, las alteraciones en las medias climáticas en el largo plazo (pasado y futuro), es posiblemente el más estudiado. En particular, es el que tiene el mayor número de investigaciones en la relación a sus impactos en la producción de alimentos. Los estudios de este tipo consisten en caracterizar el nicho climático de un cultivo y luego estimar los cambios en el mismo en distintos escenarios futuros de cambio climático o en reconstrucciones de clima pasadas. El resultado es un cálculo del cambio potencial en el rendimiento y producción neta del cultivo en un horizonte temporal delimitado. Dentro de este contexto resaltan los trabajos de Iizumi & Ramankutty (2015), quienes estimaron una caída en la producción de maíz, trigo, arroz y soja de 1981-2020 en el 33 % del área mundial, debido al aumento de temperatura. Otro trabajo importante fue el de Rosenzweig *et al.*



**Figura 1.** Tres formas en que el cambio climático puede alterar la distribución probabilística de las variables climáticas (temperatura, precipitación, etc). En primer lugar, se encuentran los cambios en las medias (arriba), en segundo en los extremos (en medio) y finalmente en la estacionalidad (abajo). En negro se muestran los valores actuales de cualquier variable climática (en este caso temperatura) y en rojo los valores esperados a futuro. Adaptado de la figura SPM-3 del IPCC (2013).

(2014), que empleó varios modelos climáticos y distintos escenarios futuros para estimar el cambio en el rendimiento de maíz, trigo, arroz y soya; encontrando, en general, una disminución en el mismo a nivel global, particularmente en los trópicos. El trabajo también muestra que ciertas opciones para mitigar la caída en el rendimiento, tales como aumentar el uso de fertilizantes químicos, no son capaces de igualar el impacto negativo del cambio en el clima a futuro.

Otra forma en la que el cambio climático puede afectar a la producción de alimentos es mediante los denominados eventos climáticos extremos. En ese sentido, la producción de alimentos se ve particularmente afectada por los relacionados a la precipitación (sequía e inundaciones), y a la temperatura (heladas y ondas de calor). Normalmente, los trabajos que relacionan extremos climático y cultivos centran su atención en eventos puntuales pasados, en regiones particulares y en un solo cultivo (p. ej. Ahmed *et al.*, 2014); no obstante, resaltan los trabajos de Moriondo *et al.* (2011), quienes estimaron el impacto potencial de los extremos térmicos en el rendimiento del cultivo de girasol y trigo a nivel global de 2071-2100 en dos escenarios contrastantes del cambio climático. También resalta el estudio de Deryng *et al.* (2014), quienes mostraron una caída en el rendimiento de maíz, soya y trigo para 2080, a causa del incremento en los eventos de calor extremos a nivel mundial.

Finalmente, se encuentran los impactos debidos a la modificación de la estacionalidad climática. Estos son notorios para la precipitación y hacen alusión a un cambio en el inicio o fin de las lluvias (aunque el primero suele ser más importante). Tienen consecuencias más claras en la agricultura de temporal, que depende de precipitaciones predecibles en el tiempo para determinar las fechas de siembra. De las tres estructuras cambiantes del clima, esta es la menos estudiada a todas las escalas y los estudios existentes se centran en países tropicales, cuya agricultura tiene una mayor dependencia de la precipitación. Por ejemplo, está el trabajo de Rademacher-Schulz (2014), quienes mostraron una disminución en el rendimiento agrícola y ganadero en Ghana, debido a cambios en la duración de la época de lluvias.

Con base en lo anterior, se puede sintetizar que cada una de las formas del cambio climático tendrá consecuencias diferenciales para la producción de alimentos en el mundo y en México. El cambio

**"El cambio en las tendencias climáticas, específicamente el aumento constante esperado en la temperatura tendrá como resultado una disminución paulatina en el rendimiento agrícola".**





en las tendencias climáticas, específicamente el aumento constante esperado en la temperatura tendrá como resultado una disminución paulatina en el rendimiento agrícola. Los eventos climáticos extremos se presentan de forma puntual con una reducción rápida y de corta duración (conocida también como shock climático), en el rendimiento agrícola, seguida de una recuperación paulatina del rendimiento en años posteriores y una repetición cíclica de ambos pasos. Finalmente, el cambio en la estacionalidad climática deriva en un aumento en la variación interanual del rendimiento de los cultivos (véase **Figura 1**). No obstante, cabe recalcar que, aunque estas formas se presentan y estudian por separado, en la realidad, las tres interactúan al mismo tiempo para generar una matriz de distintos horizontes espaciotemporales de impactos climáticos sobre los cultivos.

## **Cambio climático y producción de alimentos en México**

### ***Agricultura***

En el caso de México existen distintos estudios sobre el impacto del cambio climático en la producción de alimentos bajo este esquema de análisis (véase **Tabla 1**). Desde el punto de vista agrícola, resaltan aquellos centrados en cereales. Por ejemplo, Murray-Tortarolo *et al.* (2018) y Ureta *et al.* (2020) calcularon los cambios potenciales en el rendimiento de maíz de temporal para 2100, bajo cuatro escenarios de cambio climático, y encontraron que el rendimiento de dicho cultivo podría disminuir entre 5-10% dependiendo de la intensidad del cambio climático; con regiones en el centro del país presentando disminuciones de hasta el 30%. Para el caso del trigo, Hernandez-Ochoa *et al.* (2018) encontraron una disminución de hasta el 32% en la producción de

**Tabla 1.** Resumen de algunos estudios sobre los impactos esperados del cambio climático en algunos cultivos de México

TRABAJO	CULTIVO / GANADO	ESCALA	FORMA DE CAMBIO CLIMÁTICO	RESULTADO PRINCIPAL
MURRAY-TORTAROLO <i>et al.</i> (2018)	Maíz de temporal	Nacional	Tendencias de largo plazo (2100)	Disminución del 0.1-10% en el rendimiento del cultivo.
URETA <i>et al.</i> (2020)	Maíz (temporal e irrigado)	Nacional	Tendencias de largo plazo (2100)	Disminución general del rendimiento del maíz
HERNANDEZ-OCHOA <i>et al.</i> (2018)	Trigo (temporal e irrigado)	Nacional	Tendencias de largo plazo (2100)	Disminución de hasta el 32 % en el rendimiento
ARCE-ROMERO <i>et al.</i> (2020)	Múltiples cultivos	Estatal (14 estados)	Tendencias de largo plazo (2075-2099)	Alta vulnerabilidad de la agricultura de temporal al cambio climático
GAY <i>et al.</i> (2006)	Café	Estatal (Veracruz)	Tendencias a corto plazo (2020)	Disminución del 34 % en el rendimiento del cultivo
MEDINA-GARCÍA <i>et al.</i> (2016)	Frijol	Nacional	Tendencias a largo plazo (2070)	Disminución del 22 % en el área potencial para la siembra de este cultivo
MEDINA-GARCÍA <i>et al.</i> (2020)	Alfalfa	Nacional	Tendencias a largo plazo (2070)	Disminución del 24.7 % en el área potencial para la siembra de este cultivo
THEUSME <i>et al.</i> (2021)	Vacas, ovejas y cerdos	Estatal (Baja California)	Eventos climáticos extremos recientes (5 años)	Disminución potencial de la producción de leche y carne en el ganado debido al estrés térmico
MURRAY-TORTAROLO & JARAMILLO (2019)	Vacas, ovejas y cabras	Nacional	Eventos climáticos extremos (sequía 2011)	Disminución de las poblaciones ganaderas de vacas y cabras a nivel nacional por la sequía

temporal para finales de siglo, principalmente debido a una disminución en la precipitación. En un trabajo reciente Arce-Romero *et al.* (2020) calcularon el cambio en el rendimiento de maíz, frijol, trigo, soya, sorgo, cebada y papa en 28 escenarios del cambio climático para 14 estados de México, encontrando decrementos en el rendimiento de todos los cultivos excepto en la soya.

En el caso de otros cultivos existen menos estudios. No obstante, resalta el trabajo de Gay *et al.* (2006), en el que se evalúa el impacto del cambio climático en la producción de café de Veracruz, con reducciones esperadas del 34 % para 2020. Para el caso del frijol, existe el estudio de Medina-García *et al.* (2016), quienes encontraron una reducción del área viable para la siembra del 22 % para 2070; los mismos autores estimaron que en 2020 el área para la siembra de alfalfa se vería afectada en un 24.7 % para el año 2070. Esta lista dista de ser una revisión exhaustiva (dada la gran cantidad de otro tipo de trabajos relacionados al tema, p. ej. tesis de licenciatura y posgrado), pero evidencia que casi la totalidad de los estudios de las relaciones climático-productivas en los cultivos se han centrado en escenarios futuros de largo plazo. En ese sentido, desconocemos el impacto que han tenido y tendrán los eventos climáticos extremos a nivel nacional, así como los cambios esperados en la estacionalidad climática.

## **Ganado**

Existen pocos estudios de las relaciones entre el cambio climático y la producción ganadera en México. Dentro de estos resalta el trabajo de Theusme *et al.* (2021), quienes calcularon el cambio esperado en el estrés térmico del ganado (bovino, porcino y ovino) para el estado de Baja California. Los autores encontraron un aumento en el estrés térmico esperado en verano, particularmente en las zonas del valle,

que podría llevar a reducciones en la producción de carne y leche. Existe también el trabajo de Murray-Tortarolo & Jaramillo (2019), quienes mostraron el impacto que tuvo la sequía de 2011 en las poblaciones ganaderas a nivel nacional. Los autores demuestran que se perdió el equivalente al 3% del total de las vacas y cabras de la nación, como consecuencia de este evento climático extremo.

## **Perspectivas para investigaciones futuras**

Con base en los datos revisados se identifican varios faltantes de información que pueden servir como guía para conducir futuras investigaciones. En primer lugar, se destaca que el mayor número de estudios se centra en tendencias de largo plazo y cereales. Sobresale particularmente el caso del maíz, que ha sido ampliamente estudiado. Existe menos información para otros cultivos como frutales, hortalizas, leguminosas y pasturas, aunque se cuenta con algunos trabajos puntuales. Se conocen también estudios para el impacto de la sequía sobre el ganado, pero no para otros eventos extremos como las inundaciones y tampoco para los cultivos agrícolas. Finalmente, hay un vacío completo de información sobre el efecto que ha tenido y tendrán los cambios en la estacionalidad climática, específicamente el inicio y fin de la época de lluvias, sobre la producción de alimentos en su totalidad (véase **Tabla 2**).

## **Conclusión**

En este trabajo presentamos un resumen sobre la investigación actual de los impactos esperados del cambio climático en la producción de alimentos en México. Se utilizó el marco conceptual del IPCC (2013) para identificar tres posibles vías de cambio (medias, extremos y

**"...hay un vacío completo de información sobre el efecto que ha tenido y tendrán los cambios en la estacionalidad climática, específicamente el inicio y fin de época de lluvias, sobre la producción de alimentos en su totalidad".**



**Tabla 2.** Existentes y faltantes de investigación sobre los impactos del cambio climático en distintos elementos de la producción de alimentos en México. El símbolo “✓” indica que existe algún estudio al respecto, mientras que “✗” indica faltantes de información.

TIPO DE EVENTO/ PRODUCTO AGRÍCOLA	CEREALES	FRUTALES	HORTALIZAS Y LEGUMINOSAS	PASTURAS	GANADO
CAMBIOS DE LARGO PLAZO (TENDENCIAS)	✓ Maíz ✓ Trigo ✓ Cebada (regional) ✗ Otros	✓ Café (regional) ✗ Otros	✓ Frijol ✓ Soya (regional) ✓ Papa (regional) ✗ Otros	✓ Alfalfa ✗ Otros	✗ Todos
EVENTOS CLIMÁTI- COS EXTREMOS	✗ Todos	✗ Todos	✗ Todos	✗ Todos	✓ Sequía ✓ Ondas de calor (regional)
CAMBIOS EN LA ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA	✗ Todos	✗ Todos	✗ Todos	✗ Todos	✗ Todos

estacionalidad) y su impacto derivado en el rendimiento agrícola y ganadero. A través de este esquema de trabajo se sintetizaron los estudios actuales del tema en México y se identificaron los faltantes de información, con el fin de generar posibles propuestas de investigación a futuro. Cabe señalar las limitaciones potenciales del trabajo en torno a la revisión de literatura. En ese sentido, pese a una búsqueda exhaustiva en la literatura científica, no se incluyeron trabajos potencialmente importantes en el tema, tales como tesis de licenciatura o posgrado. Pese a lo anterior, considero que los patrones generales presentados sirven de guía para motivar la investigación en el tema, para poder mitigar en los impactos potenciales del cambio climático en la agricultura y ganadería mexicanas.

## Referencias

- Ahmed, S., Stepp, J. R., Orians, C., Griffin, T., Matyas, C., Robbat, A., Cash, S., Xue, D., Long, C., Unachukwu, U., Buckley, S., Small, D., & Kennelly, E. (2014). Effects of extreme climate events on tea (*Camellia sinensis*) functional quality validate indigenous farmer knowledge and sensory preferences in tropical China. *PLoS one*, 9(10), e109126. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109126>
- Allan, R. P., Hawkins, E., Bellouin, N., & Collins, B. (2021). IPCC, 2021: Summary for Policymakers.
- Arce Romero, A., Monterroso Rivas, A. I., Gómez Díaz, J. D., Palacios Mendoza, M. Á., Navarro Salas, E. N., López Blanco, J., & Conde Álvarez, A. C. (2020). Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation. *Atmósfera*, 33(3), 215-231. <https://doi.org/10.20937/atm.52430>
- Bell, D. M., Pabst, R. J., & Shaw, D. C. (2020). Tree growth declines and mortality were associated with a parasitic plant during warm and dry climatic conditions in a temperate coniferous forest ecosystem. *Global Change Biology*, 26(3), 1714-1724. <https://doi.org/10.1111/gcb.14834>
- Bouchama, A., Dehbi, M., Mohamed, G., Matthies, F., Shoukri, M., & Mene, B. (2007). Prognostic factors in heat wave-related deaths: a meta-analysis. *Archives of internal medicine*, 167(20), 2170-2176. <https://doi.org/10.1001/archinte.167.20.ira70009>
- Deryng, D., Conway, D., Ramankutty, N., Price, J., & Warren, R. (2014). Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034011. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034011>
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO<sub>2</sub> problem. *Annual review of marine science*, 1, 169-192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>

- Estrada, F., Botzen, W. J., & Tol, R. S. (2015). Economic losses from US hurricanes consistent with an influence from climate change. *Nature Geoscience*, 8(11), 880-884. <https://doi.org/10.1038/ngeo2560>
- Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., ... & Zaehle, S. (2020). Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269-3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., & Villers, L. (2006). Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Climatic Change*, 79(3), 259-288. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9066-x>
- Gaffney, O., & Steffen, W. (2017). The anthropocene equation. *The Anthropocene Review*, 4(1), 53-61. <https://doi.org/10.1177/2053019616688022>
- Hernandez-Ochoa, I. M., Asseng, S., Kassie, B. T., Xiong, W., Robertson, R., Pequeno, D. N. L., Sonder, K., Reynolds, M., Babar, M. A., Molero Milan, A., & Hoogenboom, G. (2018). *Climate change impact on Mexico wheat production. Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 373-387. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.008>
- Iizumi, T., & Ramankutty, N. (2015). How do weather and climate influence cropping area and intensity? *Global food security*, 4, 46-50. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.11.003>
- IPCC. (2013). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lafferty, K. D. (2009). The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology*, 90(4), 888-900. <https://doi.org/10.1890/08-0079.1>

- Medina-García, G., Ruiz-Corral, J. A., Rodríguez-Moreno, V. M., Soria-Ruiz, J., Díaz-Padilla, G., y Zarazúa Villaseñor, P. (2016). *Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México*. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(SPE13), 2465-2474.
- Medina-García, G., Echavarría-Cháirez, F. G., Ruiz-Corral, J. A., Rodríguez-Moreno, V. M., Soria-Ruiz, J., y Mora-Orozco, C. D. L. (2020). Global warming effect on alfalfa production in Mexico. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11, 34-48.
- Moritz, M. A., Parisien, M. A., Batllori, E., Krawchuk, M. A., Van Dorn, J., Ganz, D. J., & Hayhoe, K. (2012). Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere*, 3(6), 1-22.
- Moriondo, M., Giannakopoulos, C., & Bindi, M. (2011). Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Climatic change*, 104(3), 679-701.
- Murray-Tortarolo, G. (2022) A breviary of Earth's climate changes using Stephan-Boltzmann law. *Atmósfera*. Early Release. <https://www.revis-tasca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/53102>
- 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, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.011>
- Murray-Tortarolo, G. N., & Jaramillo, V. J. (2019). The impact of extreme weather events on livestock populations: the case of the 2011 drought in Mexico. *Climatic Change*, 153(1), 79-89. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02373-1>
- Rademacher-Schulz, C., Schraven, B., & Mahama, E. S. (2014). Time matters: shifting seasonal migration in Northern Ghana in response to rainfall variability and food insecurity. *Climate and Development*, 6(1), 46-52. <https://doi.org/10.1080/17565529.2013.830955>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F.,

- Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Joachim Schellnhuber, H., Nykvist, B., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., ... & Foley, J. A. (2009). *A safe operating space for humanity*. *nature*, 461(7263), 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., & Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the national academy of sciences*, 111(9), 3268-3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Scheffers, B. R., De Meester, L., Bridge, T. C., Hoffmann, A. A., Pandolfi, J. M., Corlett, R. T., Butchart, S. H. M., Pearce-Kelly, P., Kovacs, K. M., Dudgeon, D., Pacifici, M., Rondinini, C., Foden, W. B., Martin, T. G., Mora, C., Bickford, D., & Watson, J. E. (2016). The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*, 354(6313), aaf7671. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>
- Theusme, C., Avendaño-Reyes, L., Macías-Cruz, U., Correa-Calderón, A., García-Cueto, R. O., Mellado, M., Vargas-Villamil, L., & Vicente-Pérez, A. (2021). Climate change vulnerability of confined livestock systems predicted using bioclimatic indexes in an arid region of México. *Science of The Total Environment*, 751, 141779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141779>
- 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/10.20937/ATM.52430>

## 02.

# Impacto del cambio climático y medidas de adaptación para la producción de trigo de riego y temporal en México

Ixchel M. Hernández-Ochoa<sup>1</sup>, Senthold Asseng<sup>2</sup>, Belay T. Kassie<sup>3</sup>, Wei Xiong<sup>4</sup>, Ricky Robertson<sup>5</sup>, Diego Notelo Luz Pequeno<sup>6</sup>, Kai Sonder<sup>7</sup>, Matthew Reynolds<sup>8</sup>, Md Ali Babare<sup>9</sup>, Anabel Molero Milan<sup>10</sup>, Gerrit Hoogenboom<sup>11</sup>

## Introducción

El trigo es uno de los principales cereales en el mundo, por su importancia como principal fuente de energía y proteína en la dieta humana. En México, el trigo es uno de los cinco principales cultivos producidos: la producción nacional durante la temporada 2020-21 fue de 3.1 millones de toneladas, cultivadas en 480,000 ha (SIAP, 2022). La producción se concentra en los estados de Sonora, Baja California, Sinaloa, Guanajuato y Michoacán. La mayoría del trigo producido es de riego debido al clima árido y semiárido en la mayor parte del área de producción. La producción de trigo temporal es típica de las zonas

---

<sup>1</sup> Institute of Crop Science and Resource conservation, Crop Science Group, University of Bonn. Correo: [ihernandez@uni-bonn.de](mailto:ihernandez@uni-bonn.de)

<sup>2</sup> School of Life Sciences, Technical University of Munich, Germany.

<sup>3</sup> Principal Financial Group, USA.

<sup>4, 6, 7, 8, 10</sup> International Maize and Wheat Improvement Center

<sup>5</sup> International Food Policy Research Institute, USA.

<sup>9</sup> Plant Breeding & Molecular Genetics, University of Florida, USA.

<sup>11</sup> Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, USA

altas de los estados del centro y sur, además del clima tipo mediterráneo en Baja California, donde la temperatura y las precipitaciones de invierno y primavera son más adecuadas (Escobar, 2014).

Las tendencias pasadas de la temperatura global ya muestran sus efectos en la producción de trigo. En México, Asseng *et al.* (2014) reportaron tendencias de calentamiento de 0.46 y 0.27 °C por década en Obregón (Sonora) y Toluca (Estado de México), respectivamente, que han causado caídas en el rendimiento de trigo de 2 a 3 % por década para el período de 1980 a 2010. Sin embargo, Lobell *et al.* (2005) reportaron que los rendimientos de trigo en el noroeste de México aumentaron un 25 % entre 1980 y 2001, principalmente debido a las tendencias de enfriamiento en la temperatura mínima nocturna que probablemente causaron una reducción en la respiración del cultivo. Las tendencias de la temperatura global en el futuro sugieren un calentamiento continuo de hasta 2 °C a mediados de siglo (IPCC, 2013), lo que puede resultar en diferentes respuestas del cultivo de trigo y la posible necesidad de estrategias de adaptación (Asseng *et al.*, 2014; Challinor *et al.*, 2014). El incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico en el futuro puede tener un efecto positivo en el crecimiento y rendimiento de los cultivos, pero su beneficio es limitado por la temperatura, el nitrógeno (N) y las condiciones del agua (Alexandrov & Hoogenboom, 2000; Jamieson *et al.*, 2000). Las proyecciones de cambio climático para México difieren en severidad, pero todas reportan un clima más cálido y seco para mediados de siglo (Conde *et al.*, 2011; Karmalkar *et al.*, 2011; Peterson *et al.*, 2002; SAGARPA & FAO, 2012); aumentando la preocupación sobre cómo el cambio climático afectará aún más a la producción de trigo.

Hay posibles medidas para contrarrestar los efectos del cambio climático en el trigo. Los cambios simples en el manejo de cultivos pueden disminuir los impactos del cambio climático en la producción

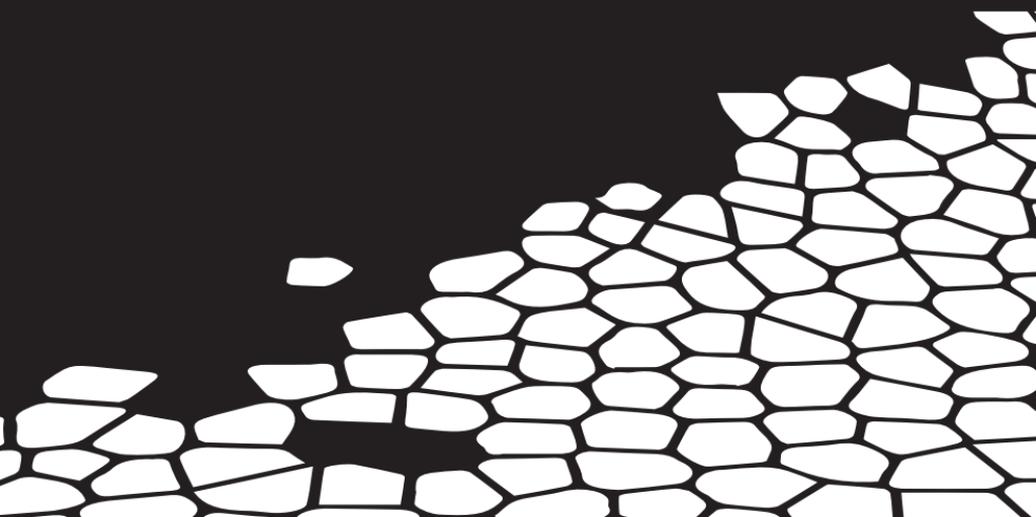
de trigo. La primera medida es cambiar la fecha de siembra, esta es una de las estrategias de adaptación más comunes al cambio climático (Araus *et al.*, 2008); la siembra temprana se da cuando la temperatura y las condiciones del agua están lo más cerca posible de las óptimas para el desarrollo y crecimiento de la planta. La segunda medida es el manejo de nutrientes; por ejemplo, añadir nitrógeno (N) que es el nutriente más limitante para el crecimiento de las plantas en el trigo de riego (Ortiz-Monasterio, 2002). La disponibilidad de N tiene un papel importante en la respuesta de este cereal al incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico, ya que las plantas con un amplio suministro de N pueden aprovechar los beneficios del enriquecimiento de CO<sub>2</sub> (Kimball, 2016).

La genética de cultivos es otro enfoque importante para ayudar a adaptarse al cambio climático (Challinor *et al.*, 2014), pero este es un proceso a largo plazo, debido al tiempo que lleva seleccionar y liberar nuevos cultivares, y aunque se han hecho avances en el uso de marcadores genéticos, estos son limitados para rasgos complejos como la tolerancia al calor y la sequía (Nakaya & Isobe, 2012; Pérez-de-Castro *et al.*, 2012). Algunos rasgos genéticos de interés pueden ser la tolerancia al estrés por temperaturas altas, el vigor temprano para aprovechar condiciones ambientales más favorables y la extensión de la etapa fenológica de floración para recuperar días perdidos por la aceleración de la fenología a temperaturas altas.

La expansión del cultivo de trigo a regiones donde se cultivaba en el pasado, puede sumar a la producción nacional actual y futura, ayudando así a la adaptación al cambio climático. En 1986, México registró un máximo histórico de tierras de trigo con 1.3 millones de ha sembradas; sin embargo, desde entonces la superficie de producción ha mostrado una tendencia a la baja, teniendo un mínimo de 0.5 y 0.7 millones de ha sembradas en producción durante 2004 y 2017, respectivamente (SAGARPA, 2017). Las fluctuaciones en las tierras de

**"El incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico en el futuro puede tener un efecto positivo en el crecimiento y rendimiento de los cultivos, pero su beneficio es limitado por la temperatura, el nitrógeno (N) y las condiciones de agua".**





cultivo de trigo se atribuyen principalmente a la disponibilidad de agua para riego y la rentabilidad de los cultivos (CNA, 2016; Curiel, 2013; USDA, 2018). Por lo tanto, la expansión del área puede ser un medio viable para aumentar la producción de trigo, en particular en combinación con un uso eficiente de insumos agrícolas (Araus *et al.*, 2008).

Los modelos de simulación de cultivos se pueden utilizar como una herramienta complementaria a los experimentos de campo y para estimar efectos de clima en la producción de trigo y realizar pruebas exploratorias de ciertos rasgos genéticos de cultivos y prácticas de manejo de cultivos que pueden ofrecer beneficios en condiciones climáticas futuras (Bergez *et al.*, 2010; Foulkes *et al.*, 2011; Gouache *et al.*, 2015). Además, el uso de conjuntos de modelos de cultivo permite cuantificar la incertidumbre del modelo que surge de las diferencias en la estructura y parametrización de ellos. También se ha sugerido que la media o la mediana del conjunto de modelos de cultivo están más cerca de los datos de campo observados que cualquier modelo individual (Asseng *et al.*, 2013; Palosuo *et al.*, 2011; Rötter *et al.*, 2012). Por consiguiente, el objetivo principal de este estudio fue explorar los impactos de cambio climático en trigo y los efectos del manejo de cultivos, los rasgos genéticos y el cambio de uso de la tierra como estrategias de adaptación al cambio climático a mediados de siglo en México, utilizando un conjunto de multi-modelos de cultivos y clima, y cuantificar la incertidumbre asociada a estos modelos.

## **Metodología**

El estudio se llevó a cabo utilizando puntos de referencia. Se utilizaron los niveles de producción y rendimiento promedio de cinco años (2010-2014), observados para el trigo en México (SAGARPA, 2017), para seleccionar 32 ubicaciones de referencia. Las ubicaciones se

seleccionaron capturando los diversos niveles de rendimiento y las condiciones ambientales para el trigo de riego y temporal (véase **Figura 1**).

Los modelos de simulación del cultivo de trigo CERES, CROPSIM y NWheat, integrados en la plataforma de *Decision Support Systems for Agrotechnology Transfer*, DSSAT v4.6 (Jones *et al.*, 2003), fueron seleccionados para realizar la investigación. Para el estudio de cambio climático se utilizaron CROPSIM y NWheat, para la parte de adaptación al cambio climático se adicionó el modelo CERES. La simulación fue ejecutada a diario, utilizando el enfoque de eficiencia en el uso de la radiación para la acumulación de biomasa del cultivo, afectada por temperatura, agua y nitrógeno. Estos modelos se han utilizado ampliamente para estudiar sistemas de cultivo en diferentes entornos.



**Figura 1.** Niveles de nitrógeno aplicados para trigo de riego en 32 localidades en México.

Los cultivares de trigo para invierno y verano fueron asignados bajo el concepto de mega-ambientes (CIMMYT, 2016), la mayoría de cultivares utilizados fueron clasificados como trigo facultativo (Hernandez-Ochoa *et al.*, 2018, 2019). El rendimiento, la producción y el área sembrada de trigo de riego y temporal a nivel estatal y distrital para el período de referencia (1980-2010) se recopilaron de SAGARPA (2017), para compararlos con los rendimientos de trigo simulados. Los datos de rendimiento de grano se corrigieron a 0 % de humedad, y fueron ajustados para remover la tendencia positiva (Hernandez-Ochoa *et al.*, 2018), la cual se asume que corresponde a la mejora tecnológica, el resto de la variabilidad de los rendimientos se atribuye a factores climáticos. Adicionalmente, se recopilaron variables relacionadas con la fenología y el rendimiento de un experimento de 6 años realizado en Obregón, Sonora (Sayre *et al.*, 1997), para comparar las variables de fenología y rendimiento con los datos simulados. El desempeño de los modelos se cuantificó calculando el error cuadrático medio por ubicación durante el período de referencia de 30 años, para la producción de trigo de riego y temporal.

Los años de 1980 a 2010 fueron seleccionados como la línea base histórica para comparar con los futuros impactos del cambio climático en la producción de trigo. Los datos climáticos para las ubicaciones de referencia se recopilaron usando como fuente el sistema de simulación MINK (Robertson, 2017). La temperatura máxima (TMAX) y mínima (TMIN) diaria, la lluvia y la radiación solar en el sistema MINK se recopilaron de la base de datos de reanálisis de los *Centros Nacionales para la Predicción Ambiental y la Corporación Universitaria para la Investigación Atmosférica* (NCEP/NCAR) (Kalnay *et al.*, 1996). Los datos de lluvia con una resolución de 0,5°, correspondientes al mismo período de tiempo, se recopilaron del *Centro Climatológico de Precipitación Global de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica*

rica (GPCC NOAA, EE. UU.). Para los escenarios futuros, se seleccionaron los Escenarios de Concentración Representativos (RCP) 4.5 y 8.5 para la evaluación de impacto de mediados de siglo (década de 2050). Los RCP son trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero para el clima futuro, adoptadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013). Adicionalmente, se recopilaron cinco escenarios de clima (GCM) reducidos y corregidos por sesgo (véase **Tabla 1**) del *Proyecto de Inter comparación de Modelos de Impacto Intersectorial* (ISI-MIP, versión revisada de noviembre de 2015) del *Potsdam Climate Institute* (Muller & Robertson, 2014). El nivel de CO<sub>2</sub> atmosférico para la línea de base histórica (nivel de línea de base) se fijó en 362 ppm, lo que corresponde a la media de 30 años del período de línea de base (1980 a 2010). Los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico para escenarios futuros (RCP 4.5= 498 ppm, RCP 8.5= 572 ppm) se basaron en el último informe del IPCC (IPCC, 2013). Además, se realizaron simulaciones de cultivos para los escenarios futuros utilizando el nivel de referencia de CO<sub>2</sub> atmosférico para estimar los

**Tabla 1.** Los modelos climáticos globales para los escenarios de cambio climático.

Modelo de clima	Acrónimo
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Earth System Model	GFDL-ESM2M
Institute Pierre Simon Laplace - Coupled Model	IPSL-CM5A-LR
Hadley Centre Global Environment Earth System Model	HADGEM2-ES
Model for Interdisciplinary Research on Climate - Earth System Model	MIROC-ESM-CHEM
The Norwegian Earth System Model	NORES-M1-M

efectos del CO<sub>2</sub> atmosférico elevado en el rendimiento del trigo.

La información del suelo utilizada corresponde a la base de datos del perfil de suelo genérico HC27 georreferenciada a una resolución de 0.083°, creada por Koo y Dimes (2010). El mapa de distribución global del suelo HC27 se derivó de la combinación de tres tipos principales de textura (arcilla, limo, arena), niveles de carbono orgánico (alto, medio, bajo) y profundidades (superficial, media, profunda). La mayoría de los suelos, en las localidades de referencia para México, se encuentran dentro de la categoría de suelos francos y arcillosos, con contenido de carbono orgánico y profundidad variable. El residuo superficial inicial se fijó en 3,000 kg ha<sup>-1</sup>, el de la masa de raíces inicial en 1,000 kg ha<sup>-1</sup> y el del nitrógeno mineral (N) inicial del suelo en 25 kg ha<sup>-1</sup> (Gbegbelegbe *et al.*, 2017). Para asegurar la germinación, y debido a la falta de observaciones iniciales del contenido de agua en el suelo, el contenido de agua inicial en las simulaciones se fijó al 100 % de capacidad de campo en los primeros 30 cm del perfil del suelo y al 10 % para el resto del perfil de este. Las simulaciones se inicializaron cada año un día antes de la siembra.

Las fechas de siembra se seleccionaron utilizando datos observados (Sayre *et al.*, 1997) y conocimientos de expertos. Las fechas de siembra seleccionadas fueron el 10 de diciembre para el invierno y el 1 de julio para la temporada de verano. Todas las simulaciones de trigo de riego se sembraron en invierno y la mayoría de las simulaciones de trigo temporal se sembraron en verano, excepto en el noroeste (Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua y Sinaloa), donde la siembra de invierno fue más adecuada en términos de temperatura y precipitaciones. La densidad de plantación fue de 300 plantas por m<sup>-2</sup> a una profundidad de plantación de 5 cm. Las cantidades de fertilizantes nitrogenados para las simulaciones de trigo irrigado oscilaron entre 90 y 140 kg ha<sup>-1</sup>, tal como se presentan en la **Figura 1**. La cantidad

de aplicación de N para trigo temporal en todas las localidades de referencia fue de  $10 \text{ kg ha}^{-1}$ , siguiendo las recomendaciones de Limón-Ortega y Villaseñor-Mir (2006). El fertilizante nitrogenado en trigo irrigado se dividió en partes iguales en dos aplicaciones: una en la siembra y la otra a los 40 días después de la siembra. En el caso del trigo temporal, se realizó una sola aplicación al momento de la siembra. El fertilizante se aplicó en banda de urea-N debajo de la superficie y se incorporó a 5 cm. La gestión del agua, para el tratamiento de riego, se fijó en riego automático al 80 % del agua máxima disponible, en los primeros 30 cm del perfil del suelo, con el fin de reducir el riesgo de estrés hídrico del cultivo.

Para el procedimiento de extrapolación de cosechas simuladas a los datos observados, se utilizaron las estadísticas de producción de trigo de 2015 observadas en distritos de riego y temporal de SAGARPA (2017) en México. Cada una de las 32 ubicaciones simuladas se asignó a un distrito y su producción de trigo, según la proximidad y el nivel de rendimiento. Los cambios delta para cada ubicación se calcularon y se encontró el cambio porcentual de la producción de RCP frente al período de referencia. Luego se aplicaron los cambios delta a la producción de trigo del distrito observada en 2015. La producción futura de trigo de riego y temporal se resumió para informar una producción nacional agregada para el período futuro de la década de 2050. La incertidumbre del modelo combinado de los GCM y los modelos de simulación de cultivos de las simulaciones se calcularon y expresaron como los percentiles 10 y 90 del promedio de los 30 años para las 32 ubicaciones de referencia.

Para las estrategias de adaptación del cambio climático se aplicaron los tratamientos en **Tabla 2**, referentes a prácticas de manejo, rasgos genéticos en trigo y expansión de áreas de producción a áreas donde se ha producido trigo previamente.

**Tabla 2.** Estrategias simuladas de adaptación al cambio climático para la producción de trigo de riego y temporal en México para la década del 2050.

Tratamiento	Descripción	Procedimiento
1	Impactos del cambio climático	Control, sin adaptación
2	Siembra, 1 semana antes	Riego: 337 DDA <sup>a</sup> ; Secano: 175 DDA
3	Siembra, 3 semanas antes	Riego: 323 DDA; Secano: 161 DDA
4	Fertilizante	Riego: +30 kg N-ha <sup>-1</sup> ; Secano: +10 kg N-ha <sup>-1</sup>
5	Tolerancia a temperatura alta	Extender la temperatura óptima por +2 °C
6	Vigor temprano	Incrementar el parámetro crecimiento temprano de la hoja por 25 %
7	Floración retrasada	Incrementar P1 por 80 unidades
8	Rasgos genéticos combinados (RCC)	Tratamientos 5 + 6 + 7
9	RCC + Siembra, 1 semana antes	Tratamientos 2 + 8
10	RCC + Siembra, 3 semanas antes	Tratamientos + 8
11	RCC + Siembra, 1 semana antes + N	Tratamientos + 4 + 8
12	RCC + Siembra, 3 semanas antes + N	Tratamientos 3 + 4 + 8
13	RCC + N	Tratamientos 4 + 8

<sup>a</sup> Día del año

## Resultados

### Clima

La temperatura y la precipitación, para la línea de base histórica (1980-2010), mostraron una variación espacial durante el invierno y el verano: en este último se proyectan temperaturas más cálidas y una mayor precipitación en la mayoría de los lugares. La temperatura promedio proyectada durante el invierno fue de 14.3 °C con precipitaciones estacionales promedio de 61 mm. La precipitación invernal en la zona norte de Baja California fue la más alta, debido a su clima de tipo mediterráneo, con un promedio de 200 mm. La temporada se proyecta que será más cálida con una temperatura promedio de 23.0 °C y una precipitación promedio de 315 mm. Los escenarios del cambio climático muestran diferentes magnitudes de cambios de temperatura y precipitaciones para la década de 2050 en México. Sin embargo, todos los GCM y ambos RCP proyectaron temperaturas más cálidas con una tendencia al calentamiento más pronunciada durante el verano. La temperatura máxima (TMÁX) en ambas estaciones tiende a aumentar más rápido que la temperatura mínima (TMÍN), que es lo opuesto a la tendencia de la temperatura global (Solomon *et al.*, 2007). El calentamiento promedio proyectado durante el invierno para RCP 4.5 fue de 2.4 °C para TMÁX y 1.0 °C para TMÍN. Para RCP 8.5, el aumento de temperatura fue mayor, promediando 2.9 °C para TMÁX y 1.6 °C para TMÍN. El calentamiento invernal fue mayor en los lugares más fríos del norte que en los estados del sur (datos no mostrados). Se proyectó que las temperaturas de verano aumentarán 2.0 °C para TMÁX y 1,9 °C para TMÍN para RCP 4.5, y 2.7 °C y 2.6 °C para TMÁX y Tmín, respectivamente, para RCP 8.5. Las proyecciones de lluvia mostraron una gran variabilidad, y se proyectó que la lluvia de invierno

**"Los escenarios del cambio climático muestran diferentes magnitudes de cambios de temperatura y precipitaciones para la década de 2050 en México".**





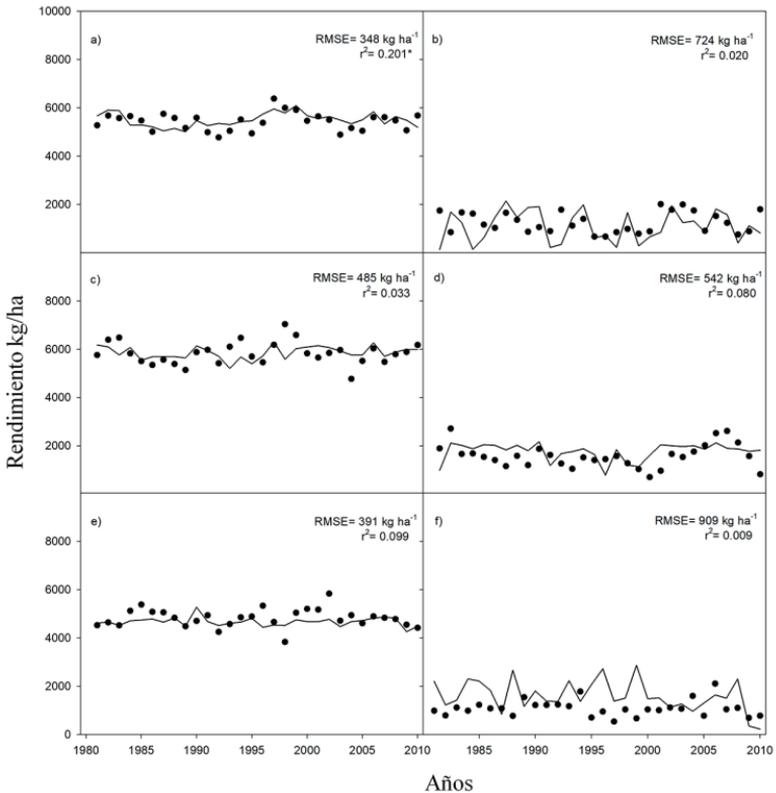
disminuiría en un promedio de 12.5 % y 17.5 % para RCP 4.5 y 8.5, respectivamente. Mientras que las proyecciones de precipitaciones de verano oscilaron entre un aumento del 5.9 % y una disminución del 19.7 %, con una variabilidad similar bajo RCP 8.5.

### ***Desempeño del modelo***

El error cuadrático medio (RMSE) para el trigo de riego estuvo entre 348 y 485 kg ha<sup>-1</sup> y entre 542 y 909 kg ha<sup>-1</sup> para el trigo temporal (véase **Figura 2**). Las comparaciones indicaron que, en general, las simulaciones podían simular los niveles de rendimiento de trigo observados, pero los datos observados tienden a ser más variables, considerando que los rendimientos registrados son datos estatales, que podrían haber sido afectados por otros factores no considerados en las simulaciones puntuales (p. ej., cambio entre años), y dentro de una región en fecha de siembra, variedad de trigo fertilizante, riego, plagas y enfermedades, etc.).

### ***Impacto de cambio climático en la fenología y rendimiento del trigo en México***

Los impactos del cambio climático simulados dieron como resultado una fenología acelerada del trigo, con una floración más temprana y un período de llenado de grano reducido (tiempo desde la floración hasta la madurez fisiológica), durante ambas estaciones, como resultado del calentamiento de las temperaturas en los escenarios futuros. La fecha de floración de invierno para la línea base fue a mediados de marzo y de 6 días antes para RCP 4.5 y 8 días antes para RCP 8.5. El período de llenado de grano también se vio afectado, pasando de 44 días en la línea de base a 42 días bajo ambos RCP. La fecha de floración para el



**Figura 2.** Rendimiento de grano de trigo observado (símbolo) y simulado (línea), bajo riego para a) Sonora (140 kg N ha<sup>-1</sup>), c) Baja California (130 kg N ha<sup>-1</sup>), e) Guanajuato (90 kg N ha<sup>-1</sup>), y temporal para b) Nuevo León (10 kg N ha<sup>-1</sup>), d) Zacatecas (10 kg N ha<sup>-1</sup>), y f) Guanajuato (10 kg N ha<sup>-1</sup>) para el período de referencia en México (1980-2010) de SAGARPA (2017). Se eliminó la tendencia de los rendimientos de trigo observados para las mejoras tecnológicas y se ajustó a 0 % de humedad del grano. Los rendimientos de trigo simulados son el promedio de los modelos de simulación de cultivos CROPSIM y NWheat que representan un estado.

trigo sembrado en verano fue a principios de septiembre para la línea de base, pero fue 4 días antes para RCP 4.5 y 5 días antes para RCP 8.5. El período de llenado de grano para el trigo sembrado en verano fue 5 y 7 días más corto en RCP 4.5 y 8.5, respectivamente.

La **Figura 3** muestra los cambios simulados en el rendimiento del trigo de riego y temporal por ubicación para 2050. Los impactos del cambio climático simulados tienden a ser más consistentes para los rendimientos de trigo de riego; mientras que los impactos del cambio climático en los rendimientos de trigo temporal fueron muy variables, principalmente a causa de la variabilidad espacial de las precipitaciones en todo el territorio del país. Se prevé que los rendimientos de trigo bajo riego disminuirán hasta -13% bajo RCP 4.5, excepto en el norte de Zacatecas, donde las temperaturas más cálidas y el CO<sub>2</sub> elevado mejorarán las condiciones de crecimiento subóptimas. Las localidades en el norte de Coahuila muestran el impacto más negativo del cambio climático, debido a las condiciones ya cálidas durante el llenado del grano causadas por la floración tardía, en comparación con el resto de las localidades (datos no mostrados).

Para RCP 8.5, los cambios simulados en el rendimiento del trigo de riego tienden a ser más pesimistas, ya que la mayoría de las ubicaciones muestran disminuciones en el rendimiento, excepto en el norte de Zacatecas, pero el efecto positivo aún es menor que para RCP 4.5 (véase **Figura 3**). Se prevé que los estados del noroeste, donde actualmente se cultiva más del 75% del trigo de riego, sean una de las regiones más afectadas de México, ya que las tendencias de calentamiento proyectadas en esta región son más altas que en los estados del sur (véase **Figura 3**). Los impactos del cambio climático en los rendimientos del trigo temporal fueron mayores, mostrando principalmente disminuciones en el rendimiento. Sin embargo, importantes localidades productoras de trigo temporal en Zacatecas, Michoacán,

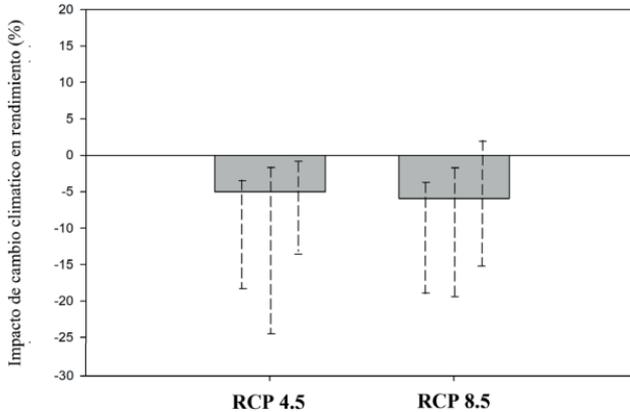


Oaxaca y Chiapas evidencian cambios positivos en el rendimiento como resultado de la mejora de las condiciones subóptimas ya sea de temperatura, lluvia o ambas, pero también gracias al incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico en el futuro. Los impactos más negativos se observaron en el noroeste, pero la producción temporal en esta área es mínima. Las disminuciones de rendimiento tendieron a ser mayores para RCP 8.5, debido a una temperatura más cálida y un clima más seco en este escenario de emisión.

Al extrapolar los cambios de rendimiento de trigo simulado a las proporciones de producción de trigo de riego y temporal de cada distrito y promediar ambos métodos, los impactos del cambio climático sugieren una disminución en la producción de trigo agregada (de riego + temporal) para 2050, con RCP 4.5, lo que muestra un impacto en el rendimiento de -5.0% y RCP 8.5 un impacto de -5.9% (véase **Figura 4**). La variabilidad de un año a otro es considerablemente menor que la variabilidad espacial, debido a las diferencias climáticas regionales en México. La incertidumbre del modelo tiende a ser grande, principalmente como resultado de las diferentes magnitudes de los impactos del cambio climático capturados por los modelos de simulación de cultivos, que van desde -0.7 a -13.6% para RCP 4.5 y de 2.2 a -15.4% para RCP 8.5.

### ***Impacto de las estrategias de adaptación para el futuro (2040-2070)***

Bajo escenarios climáticos futuros, las fechas tempranas de siembra resultaron en impactos negativos en el rendimiento para los sistemas de riego y temporal bajo ambos RCP (véase **Figura 5**). El aumento del tratamiento con fertilizante nitrogenado resultó en uno de los mayo-



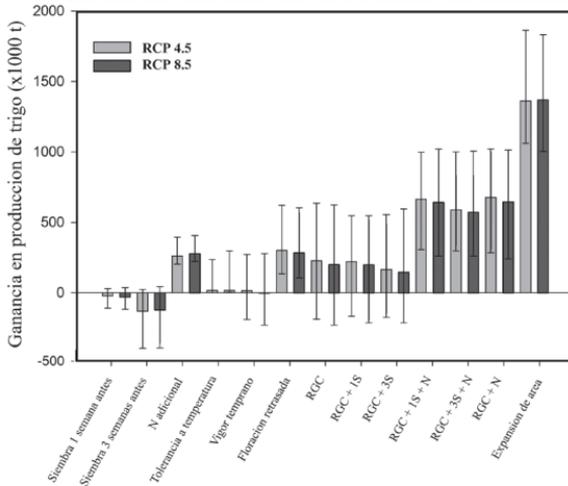
**Figura 4.** Impacto simulado del cambio climático (incluidos los cambios en la temperatura, la precipitación y la concentración atmosférica de  $\text{CO}_2$ ) en el rendimiento del trigo en México para dos Escenarios de Concentración Representativas (RCP 4.5 y 8.5), para la década de 2050. Las barras de error, (de arriba a abajo que indican los percentiles 10 y 90) de izquierda a derecha, representan la variabilidad de 30 años, la variabilidad de 32 ubicaciones y la incertidumbre de los modelos (combinación de dos modelos de simulación - CROPSIM y NWheat, y cinco GCM).

res impactos positivos en el rendimiento del trigo tanto en sistemas de riego como de temporal. En cuanto a los rasgos genéticos individuales, la floración tardía resultó en la mayor respuesta positiva de rendimiento entre todos los tratamientos, mientras que la tolerancia al calor y el vigor temprano mostraron efectos positivos mínimos en el rendimiento en los escenarios futuros (véase **Figura 6**). Los rasgos genéticos combinados para el futuro dieron como resultado impactos positivos para los sistemas de riego, que fue el más alto cuando también se combinó con el aumento de la tasa de fertilizante nitrogenado. Las respuestas del trigo temporal fueron más variables y mostraron impactos de rendimiento en su mayoría neutrales o negativos para los rasgos genéticos combinados, pero de manera similar al sistema

**Medidas de adaptación de genética del cultivo, prácticas de manejo como la fertilización con nitrógeno, y expansión del área de producción pueden ayudar a mantener o incrementar la producción de trigo en el futuro.**







**Figura 5.** Cambios en la producción de trigo de México (con riego y temporal combinados, agregada a través de la producción reportada por municipio en 2015 de 3.7 millones de t representadas por cada ubicación simulada) implementando estrategias de adaptación individuales y combinadas bajo condiciones del cambio climático para los Escenarios de Concentración Representativas 4.5 y 8.5 en la década de 2050. Las barras de error de arriba a abajo representan los percentiles 10 y 90 de la respuesta simulada de los impactos agregados nacionales de tres modelos de simulación de cultivos (CERES-trigo, CROPSIM y NWheat) y cinco modelos climáticos globales. RGC son rasgos genéticos combinados.

de riego, los rasgos genéticos combinados con una mayor tasa de fertilizante N fue la estrategia de adaptación más efectiva. En cuanto a la incertidumbre del modelo de cultivo, los modelos de cultivo simularon un rango consistente de respuestas para la producción con riego y mostraron una mayor incertidumbre para el trigo temporal, particularmente debido a las diferentes respuestas del modelo de cultivo al rasgo de vigor temprano, donde CROPSIM produjo impactos negativos, pero los otros dos modelos dieron impactos positivos en

el rendimiento (datos no mostrados). Además, todos los modelos de cultivo simularon una respuesta positiva del rendimiento del trigo a la floración tardía, siendo CERES el que mejor respondió. Para la tolerancia al calor, NWheat tuvo la respuesta positiva más alta; mientras que CERES mostró una respuesta mínima.

La expansión de áreas para la producción de trigo mostró un gran potencial para aumentar la producción futura de trigo en México. Bajo escenarios futuros y a pesar de los impactos negativos del cambio climático, el uso adicional de la tierra para trigo podría aumentar la producción nacional de trigo en un 33.7% para RCP 4.5 y en un 33.3% para RCP 8.5 (véase **Figura 5**). La mayoría de los rasgos genéticos individuales y combinados tienen el potencial de aumentar la producción nacional de trigo en el futuro. En términos de tratamientos individuales, la floración tardía y el aumento de la fertilización con N mostraron la mayor adición a la producción nacional de trigo. Los resultados sugieren que la combinación de rasgos genéticos con mayores aplicaciones de fertilizantes nitrogenados podría sumar hasta 672 066 toneladas de trigo por año. Sin embargo, se proyecta que la estrategia más efectiva sea la expansión de la producción de trigo a todas las áreas donde se haya cultivado previamente trigo (véase **Figura 6**).

## Discusión

Un conjunto de modelos múltiples permitió explorar los efectos del cambio climático en los rendimientos de trigo para la década de 2050, lo que indicó impactos negativos del cambio climático en la producción de este cereal en México. Si bien estudios previos en México intentaron determinar los efectos del cambio climático usando un número limitado de GCM y/o modelos de cultivo, o simplemente explorando el efecto único del aumento de las temperaturas en los rendimientos de

trigo, en este estudio exploramos los efectos futuros combinados de la temperatura, cambios en las precipitaciones y niveles elevados de CO<sub>2</sub> en la producción de trigo utilizando 5 GCM y conjuntos de tres modelos. La variabilidad espacial fue mayor que la variabilidad temporal, con la mayoría de las ubicaciones proyectando disminuciones en el rendimiento, especialmente debido al aumento de las temperaturas, y a pesar del efecto de alivio del incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico. Las incertidumbres fueron altas, principalmente como resultado de las diferencias estructurales en los modelos de simulación de cultivos, aunque cuando se usaba el promedio de los dos modelos, las respuestas de rendimiento simulado estaban más cerca de las observaciones que cuando se comparaba con un solo modelo, como en estudios previos (Asseng *et al.*, 2014; Martre *et al.*, 2015; Palosuo *et al.*, 2011).

Las temperaturas cálidas aceleran la fenología de las plantas, acortando el ciclo de crecimiento. Bajo temperaturas cálidas, el número de espiguillas y el número de granos por espiguilla disminuyen, lo que resulta en una reducción del número de granos (Johnson & Kanemasu, 1983). El estrés por calor (causado por temperaturas superiores a 32 °C después de la floración) acelera la senescencia de las hojas (Al-khatib & Paulsen, 1984), y el período de llenado del grano tiende a ser más corto, lo que limita el tiempo de crecimiento del grano (Asseng *et al.*, 2014). Los modelos de simulación de cultivos utilizados en el estudio actual pudieron capturar los efectos de la temperatura, simulando una floración más temprana, un período de llenado de grano y rendimientos reducidos bajo temperaturas más cálidas proyectadas. Nuestro estudio sugiere disminuciones constantes en el rendimiento del trigo de riego del 6.2% por cada grado de aumento de la temperatura durante el invierno, lo que se encuentra dentro de los rangos reportados en la literatura. Los sistemas de trigo temporal mostraron respuestas más variables que los sistemas de riego, debido a los efectos combinados

de las temperaturas de referencia (1980-2010) ya cálidas (Liu *et al.*, 2016) y futura disminución de la precipitación, con reducciones de rendimiento proyectadas que van del 5.0 al 7.0 % por grado de aumento en la temperatura. Sayre *et al.* (1997) reportaron que aumentos de 1.0 °C durante el período de enero a abril en Sonora, México, dieron como resultado que la floración ocurriera 11 días antes y que el período de llenado del grano se acortara en 3 días, lo cual es similar a nuestra fenología simulada; los rendimientos de grano disminuyeron un 8.5 % en promedio durante el período de estudio de 6 años. Los sistemas de riego se simularon utilizando riego automático, por lo que el estrés hídrico fue mínimo, aunque se ha informado que los efectos de este tienden a ser más severos a medida que aumenta la temperatura (Shah & Paulsen, 2003). En el caso del trigo temporal, el riego suplementario puede ser una opción para reducir los efectos negativos de la variabilidad de las precipitaciones (Xiao *et al.*, 2005) y, como resultado, disminuir el estrés hídrico y aumentar los rendimientos, lo que a su vez puede ayudar a reducir futuras efectos del cambio climático.

El conjunto multi-modelo trigo-clima aplicado aquí mostró el potencial de las estrategias de adaptación para contrarrestar los efectos negativos del cambio climático en la producción de trigo en México a mediados de siglo. A pesar de las incertidumbres del modelo, la más efectiva de todas las estrategias, según nuestras simulaciones, fue expandir el área de cultivo de trigo a áreas previamente utilizadas para trigo. La segunda estrategia más eficaz fue una combinación de rasgos genéticos del cultivo junto con un aumento de fertilizante nitrogenado. Las respuestas del modelo de trigo fueron más consistentes para el trigo de riego que para los sistemas de trigo temporal. Parry *et al.* (2004) sugirieron proyecciones más pesimistas que nuestro estudio, previendo entre un 5 y un 10 % de disminución del rendimiento en la

producción mundial de trigo para mediados de siglo, incluso al aplicar estrategias de adaptación como cambios en las fechas de siembra, cultivares, fertilizantes e irrigación.

## **Conclusiones**

Se proyecta que el cambio climático reducirá la producción nacional de trigo en el futuro en México, pero las características genéticas de los cultivos, el manejo de los cultivos y la expansión de las áreas de producción pueden ayudar a contrarrestar estos efectos negativos. Sin embargo, estas adaptaciones vienen con sus propios desafíos. El mejoramiento de un nuevo cultivar es un proceso lento. Los modelos de simulación de cultivos pueden contribuir al proceso de mejoramiento como una herramienta complementaria para explorar rasgos genéticos, que pueden ayudar a una mejor comprensión del comportamiento del cultivo bajo ciertas condiciones ambientales. Además, los recursos de suelo y agua ya están sufriendo un uso excesivo, y se prevé que su condición se deteriorará aún más en el futuro. Por lo tanto, estos recursos deben manejarse de forma sostenible, mejorando el riego, el manejo de fertilizantes, introduciendo la rotación de cultivos e incorporando residuos que puedan contribuir a la construcción de suelos resilientes. Las estrategias de adaptación requieren inversiones de recursos en el presente para ver las ventajas en el futuro. Contribuir a la mejora de la producción de cultivos en su conjunto resultará en una mejor producción para México, pero también puede contribuir a otras regiones productoras de trigo de riego y temporal en todo el mundo.

## Referencias

- Alexandrov, V.A. & Hoogenboom, G. (2000). Vulnerability and adaptation assessments of agricultural crops under climate change in the Southeastern USA. *Theoretical and Applied Climatology*, 67(1-2), 45-63. <https://doi.org/10.1007/s007040070015>
- Al-khatib, K. & Paulsen, G. M. (1984). Mode of high-temperature injury to wheat during grain development. *Physiologia Plantarum*, 61(3), 363-368. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1984.tb06341.x>
- Araus, J.L., Slafer, G.A., Royo, C. & Serret, M.D. (2008). Breeding for Yield Potential and Stress Adaptation in Cereals. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27(6),377-412. <https://doi.org/10.1080/07352680802467736>
- Asseng, S., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J. W., Hatfield, J. L., Ruane, A. C., Boote, K. J., Thorburn, P. J., Rötter, R. P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P. K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A. J., Doltra, J., ... & Wolf, J. (2013). Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 827-832. <https://doi.org/10.1038/nclimate1916>
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., Kimball, B. A., Ottman, M. J., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Prasad, P. V. V., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A. J., De Sanctis, G., Doltra, J., ... Zhu, Y. (2014). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143-147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Bergez, J. E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., & Sadok, W. (2010). Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy*, 32(1), 3-9. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.001>
- Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R., & Chhetri, N.(2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and

- adaptation. *Nature Climate Change*, 4, 287-291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
- CIMMYT. (2016). Wheat Atlas: Wheat varieties. *International Center of Wheat and Maize Improvement*. <http://wheatatlas.org/?AspxAutoDetectCookieSupport=1>
- CNA. (2016). *Estadísticas del agua en México, Comisión Nacional de Agua*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Conde, C., Estrada, F., Martínez, B., Sánchez, O. & Gay, C. (2011). Regional climate change scenarios for México. *Atmosfera*, 24(1), 125-140.
- Curiel, R. (2013). MasAgro por la seguridad alimentaria y el desarrollo agrícola sustentable de México. *Revista Claridades Agropecuarias*, 237, 9-18.
- Escobar, R. (2014). *El cultivo de secano*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Foulkes, M. J., Slafer, G. A., Davies, J., Berry, P. M., Sylvester-Bradley, R., Martre, P., Calderini, D. F., Griffiths, S., & Reynolds, M. P. (2011). Raising yield potential of wheat. III. Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance. *Journal of Experimental Botany*, 62(2), 469-486. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq300>
- Gbegbelegbe, S., Cammarano, D., Asseng, A., Robertson, R., Chung, U., Adam, M., Abdalla, O., Payne, T., Reynolds, M., Sonder, K., Shiferaw, B., & Nelson, G. (2017). Baseline simulation for global wheat production with CIMMYT mega-environment specific cultivars. *Field Crops Research*, 202, 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.06.010>
- Gouache, D., Bogard, M., Thepot, S., Pegard, M., Le Bris, X., & Deswarte, J-C. (2015). From ideotypes to genotypes: approaches to adapt wheat phenology to climate change. *Procedia Environmental Sciences*, 29, 34-35. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.143>
- Hernandez-Ochoa, I. M., Asseng, S., Kassie, B. T., Xiong, W., Robertson, R., Luz Pequeno, D. N., Sonder, K., Reynolds, M., Babar, M. A., Molero Milan, A., & Hoogenboom, G. (2018). Climate change impact on Mexico wheat production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 373-387. <https://doi.org/10.1016/j.agrfor.2018.05.010>

[doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.008](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.008)

- Hernandez-Ochoa, I. M., Luz Pequeño, D. N., Reynolds, M., Babar, M. A., Sonder, K., Molero Milan, A., Hoogenboom, G., Robertson, R., Gerber, S., Rowland, D. L., Fraisse, C. W., & Asseng, S. (2019). Adapting wheat to climate change in Mexico: Management, breeding options and land use change. *European Journal of Agronomy*, 109, 125915. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125915>
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge.
- Jamieson, P. D., Berntsen, J., Ewert, F., Kimball, B. A., Olesen, J. E., Pinter Jr, P. J., Porter, J. R., & Semenov, M. A. (2000). Modelling CO<sub>2</sub> effects on wheat with varying nitrogen supplies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82(1-3), 27-37. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00214-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00214-0)
- Johnson, R. C., & Kanemasu, E. T. (1983). Yield and Development of Winter Wheat at Elevated Temperatures. *Agronomy Journal*, 75(3), 561-565. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500030033x>
- Jones, J., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3): 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., ... & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2)
- Karmalkar, A. V., Bradley, R. S., & Diaz, H. F. (2011). Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections. *Climate Dynamics*, 37(3-4), 605-629. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-1000-0>

[org/10.1007/s00382-011-1099-9](https://doi.org/10.1007/s00382-011-1099-9)

- Kimball, B. A. (2016). Crop responses to elevated CO<sub>2</sub> and interactions with H<sub>2</sub>O, N, and temperature. *Current Opinion in Plant Biology*, 31, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.03.006>
- Koo, J., & Dimes, J. (2010). *HC27: Generic/Prototypical Soil Profiles*. International Food Policy Research Institute, & University of Minnesota. <https://www.ifpri.org/publication/hc27-generic-soil-profile-database>
- Limon-Ortega, A., & Villaseñor-Mir, E. (2006). Nitrogen fertilizer mManagement and Recommendations for Wheat Production in Central Mexico. *Crop Management* 5(1), 1-10. <https://doi.org/10.1094/CM-2006-0525-01-RS>
- Liu, B., Asseng, S., Müller, C., Ewert, F., Elliott, J., Lobell, D. B., Martre, P., Ruane, A. C., Wallach, D., Jones, J. W., Rosenzweig, C., Aggarwal, P. K., Alderman, P. D., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Cammarano, D., Challinor, A., Deryng, D., ... & Zhu, Y. (2016). Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. *Nature Climate Change*, 6, 1130-1138. <https://doi.org/10.1038/nclimate3115>
- Lobell, D. B., Ortiz-Monasterio, J. I., Asner, G. P., Matson, P. A., Naylor, R. L., & Falcon, P. F. (2005). Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 94(2-3), 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.007>
- Martre, P., Wallach, D., Asseng, S., Ewert, F., Jones, J. W., Rötter, R. P., Boote, K. J., Ruane, A. C., Thorburn, P. J., Cammarano, D., Hatfield, J. L., Rosenzweig, C., Aggarwal, P. K., Angulo, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Brisson, N., Challinor, A., ... & Wolf, J. (2015). Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Global Change Biology*, 21(2), 911-925. <https://doi.org/10.1111/gcb.12768>
- Muller, C., & Robertson, R. D. (2014). Projecting future crop productivity for global economic modeling. *Agricultural Economics*, 45(1), 37-50. <https://doi.org/10.1111/agec.12088>
- Nakaya, A., & Isobe, S. N. (2012). Will genomic selection be a practical method

- for plant breeding? *Annals of Botany*, 110(6), 1303-1316. <https://doi.org/10.1093%2Faob%2Fmcs109>
- Ortiz-Monasterio, J. I. (2002). Nitrogen management in irrigated spring wheat. In: B. C. Curtis, S. Rajaram, & H. Gomez-Macpherson (Eds.), *Bread wheat: Improvement and production*. FAO Plant Production and Protection Series. No. 30 (pp. 433-451). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J. E., Patil, R. H., Ruget, F., Rumbaur, C., Takáč, J., Trnka, M., Bindi, M., Çaldağ, B., Ewert, F., Ferrise, R., Mirschel, W., Şaylan, L., Šiška, B., & Rötter, R. (2011). Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy*, 35(3), 103-114. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.05.001>
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. & Fischer, G. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 14(1), 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.008>
- Pérez-de-Castro, A. M, Vilanova, S., Cañizares, J., Pascual, L., Blanca, J. M., Díez, M. J., Prohens, J., & Picó, B.(2012). Application of Genomic Tools in Plant Breeding. *Current Genomics*, 13(3), 179-195. <https://doi.org/10.2174%2F138920212800543084>
- Peterson, A. T., Ortega.Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R. H., & Stockwell, D. R. B. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416, 626-629. <https://doi.org/10.1038/416626a>
- Robertson, R. (2017). *Mink, Details of a global gridded crop modeling system*. International Food Policy Research Institute.
- Rötter, R. P, Palosuo, T., Kersebaum, K. C., Angulo C., Bindi, M., Ewert, F.,

- Ferrise, R., Hlavinka, P., Moriondo, M., Nendel, C., Olesen, J. E., Patil, R. H., Ruget, F., Takáč, J., & Trnka M. (2012). Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: A comparison of nine crop models. *Field Crops Research*, 133, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.016>
- SAGARPA, & FAO (2012). *Mexico: El sector agropecuario ante el desafío del cambio climático*. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación & Food and Agriculture Organization.
- SAGARPA (2017). Anuario estadístico de la producción agrícola. Available at: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- Sayre, K. D., Rajaram, S., & Fischer, R. A. (1997). Yield Potential Progress in Short Bread Wheats in Northwest Mexico. *Crop Science*, 37(1), 36-42. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010006x>
- Shah, N. H. & Paulsen, G. M. (2003). Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat. *Plant and Soil*, 257(1), 219-226. <https://doi.org/10.1023/A:1026237816578>
- SIAP (2022). Avance de siembras y cosechas. [https://nube.siap.gob.mx/avance\\_agricola/](https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/)
- USDA. (2018). Mexico. Grain and feed annual. Slight changes in production as grain imports continue upward trend.
- Xiao, G., Liu, W., Xu, Q., Sun, Z., & Wang, J. (2005). Effects of temperature increase and elevated CO<sub>2</sub> concentration, with supplemental irrigation, on the yield of rain-fed spring wheat in a semiarid region of China. *Agricultural Water Management*, 74(3), 243-255. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.11.006>

## 03.

# Semillas, agricultura y cambio climático en México<sup>1</sup>

Carol Hernández Rodríguez<sup>2</sup>

### Introducción

Las actividades agrícolas y ganaderas tienen un alto impacto ambiental y son responsables de la generación de aproximadamente un tercio de los gases de efecto invernadero (GEI) que se emiten anualmente a la atmósfera (IPCC, 2019). Al mismo tiempo, estos sectores productivos, y con ellos los sistemas agroalimentarios del mundo entero, son altamente vulnerables a los efectos del calentamiento global, entre otros, cambios en los patrones de precipitación y humedad del suelo (IPCC, 2021, 2022). La vulnerabilidad es aún mayor para la agricultura de subsistencia campesina en los países del sur global (IPCC, 2019; FAO, 2016; Bellon & van Etten, 2013). Entre otras características, este tipo de agricultura suele ser de temporal, usar semillas nativas o criollas<sup>3</sup>, enfocarse en el autoconsumo (aunque la venta a pequeña escala de excedentes y algunos cultivos comerciales como el café suelen ser vitales para el ingreso familiar) utilizar menos de cinco hectáreas

---

<sup>1</sup> Este trabajo complementa mi participación en el Seminario Agricultura y Cambio Climático. ¿Qué sabemos del Cambio Climático en México?, organizado en septiembre de 2021 por el Programa de Investigación en Cambio Climático de la UNAM. La grabación de la presentación, en la cual podrán ver gráficas y otros datos relevantes, la pueden encontrar en el siguiente link: <https://www.facebook.com/PINCCDELAUNAM/videos/187644203448187>

<sup>2</sup> Programa Universitario de Bioética, Universidad Nacional Autónoma de México. Correo: [hcarol@unam.mx](mailto:hcarol@unam.mx)

<sup>3</sup> Las semillas criollas resultan de la mezcla por parte de los campesinos de semillas nativas con variedades comerciales, las cuales continúan siendo reproducidas por los agricultores (Perales, 2016).

de tierra con suelos de poca productividad agrícola, recibir pocos o nulos subsidios y asistencia técnica por parte de los gobiernos, y complementarse con la incorporación parcial de los campesinos al mercado laboral formal o informal (Morton, 2007; Centro Geo, 2023).

Esta desprotección de la agricultura de subsistencia frente al cambio climático es significativa, particularmente si consideramos que ésta continúa desempeñando un papel central en, al menos, dos áreas: producción de alimentos y conservación de agrobiodiversidad (FAO, 2021; Coomes *et al.*, 2015). Respecto a la producción de alimentos, la FAO (2021) estima que la agricultura familiar, aquella con menos de dos hectáreas de tierra dedicadas al cultivo—dentro de la cual podemos integrar a la agricultura de subsistencia—produce cerca de 32 % del total global de alimentos, ocupando tan solo el 24 % de la tierra agrícola disponible (Ritchie, 2021a). Aunque los porcentajes varían considerablemente entre países, es relevante destacar que los sistemas agroalimentarios de muchas naciones en el sur, y de la gran mayoría de la población rural, dependen esencialmente de la agricultura familiar (Lowder *et al.*, 2021).

Además de producir alimentos, la agricultura de subsistencia continúa jugando un papel central en la conservación y evolución de la agrobiodiversidad (Pautasso *et al.*, 2013; Bellon *et al.* 2018). El origen de la agricultura y la domesticación de los cultivos que hoy sustentan nuestros sistemas agroalimentarios, ha sido posible gracias al trabajo acumulado por milenios de comunidades campesinas a través del mundo; solo recientemente, con el desarrollo del fitomejoramiento formal a finales del siglo XIX, los fitomejoradores han también contribuido al desarrollo de los recursos genéticos para la agricultura (Kingsbury, 2009; Curry, 2022 Kloppenburg, 2004). Los centros de origen y diversidad de cultivos identificados por Vavilov (Harris, 1990), así como los principales centros de biodiversidad conocidos

como *biodiversity hotspots* (Myers *et al.*, 2000), se encuentran en su gran mayoría en países del sur global, donde la agricultura de subsistencia es aún predominante. Por lo tanto, cuando hablamos de los impactos del cambio climático sobre la agricultura de subsistencia, también estamos hablando de éstos sobre la biodiversidad contenida en esos territorios. El deterioro o abandono de la agricultura de subsistencia conlleva el riesgo potencial de una pérdida extendida de la agrobiodiversidad (Jackson *et al.*, 2013; Bellon & van Etten, 2013). Alternativamente, su conservación y reproducción es clave para mantener activa una fuente de recursos genéticos amplia que podrían facilitar la adaptación de la agricultura a futuras variaciones climáticas (Bellon & van Etten, 2013; Bellon *et al.*, 2018; Mercer *et al.*, 2012). Por estas razones, se reconoce la necesidad de fortalecer los sistemas de semillas integrados (Louwaars & Simon de Boef, 2012), en los cuales se trabaja conjuntamente en la conservación *in situ* y *ex situ*, así como en el desarrollo de variedades locales, híbridas comerciales y biotecnológicas, favoreciendo la ampliación y diversificación de los recursos fitogenéticos.

Haciendo eco de las voces de múltiples movimientos campesinos —particularmente La Vía Campesina—, ONGs y sectores académicos, la FAO (2021) reconoce que la agricultura familiar, dentro de la cual se integra la agricultura de subsistencia, es crucial en el contexto del cambio climático tanto para la seguridad alimentaria global y la conservación de la agrobiodiversidad, como para el fortalecimiento de sistemas agroalimentarios más sustentables. Sin embargo, remarca la organización, los gobiernos necesitan respaldar ampliamente a las comunidades campesinas y brindarles acceso a subsidios, créditos y tecnológicas sustentables, y al mismo tiempo fortalecer los sistemas de conocimientos y organización autóctonos, propiciar un mayor acceso de las mujeres y jóvenes a la propiedad de la tierra, y apoyar

la creación o consolidación de cooperativas y mercados para la producción local. El cambio climático nos obliga a pensar en proyectos de mitigación y adaptación diferenciados, pero interconectados, que integren complementariamente la agricultura industrial y la campesina bajo sistemas agroalimentarios más sustentables y justos.

## **Impactos de la agricultura y ganadería en el medio ambiente**

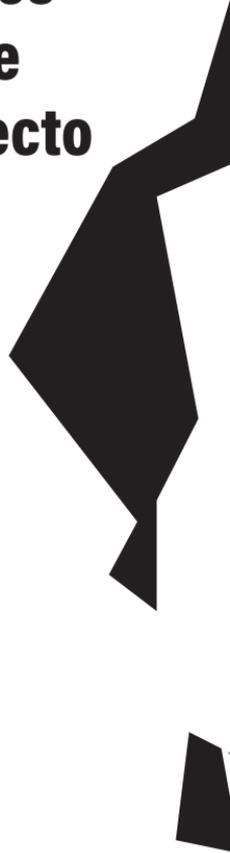
Nuestra forma de producir y consumir alimentos tiene un impacto inmenso en el medio ambiente. Aproximadamente el 50% de la tierra habitable en el planeta, descartando desiertos y glaciares, es utilizada para actividades agrícolas y ganaderas (IPCC, 2019). Este sector es responsable del 70% de la extracción de agua dulce (FAO, 2011a) y del 78% de la eutrofización de los océanos y cuerpos de agua continentales (Poore & Nemecek, 2018). El 94% de la biomasa mamífera que existe en el planeta, excluyendo a los humanos, es ganado (Bar-On *et al.*, 2018). El sector agrícola, incluyendo la acuicultura, constituye una amenaza directa para 24,000 especies en peligro de extinción (Ritchie *et al.*, 2022).

De las emisiones de GEI derivadas de nuestros sistemas agroalimentarios, una tercera parte es generada por el uso de suelo (deforestación, cultivo, drenaje y quema de suelos), y casi un 40% por la producción agrícola (generación de metano por el ganado, aplicación de agroquímicos, uso de electricidad, etc.) (Poore & Nemecek, 2018; Ritchie, 2021b). Poco menos de 20% de las emisiones proviene de la cadena de abastecimiento (transporte, empaquetamiento, venta, etc.), y el consumo y los desechos de alimentos son responsables del restante 10% de las emisiones (Ritchie *et al.*, 2022; FAO, 2011b).

La ganadería ocupa 77 % de la tierra agrícola y genera, junto con la pesca, poco más de dos terceras partes de todas las emisiones de GEI de nuestros sistemas agroalimentarios (Ritchie, 2019; Poore & Nemecek, 2018). El gran impacto ambiental de la generación de alimentos de origen animal, particularmente carne y lácteos, contrasta con el hecho de que menos de 20 % de todas las calorías y menos de 40 % de todas las proteínas consumidas en el mundo provienen de estos alimentos (Ritchie *et al.*, 2021b). Estas cifras nos sugieren dos tendencias: (1) la continua relevancia de las proteínas y calorías de origen vegetal en las dietas de una gran proporción de la población mundial, particularmente en los países del sur y los sectores rurales y de menores ingresos; y (2) la distribución desigual en el acceso a los alimentos de origen animal entre los diferentes sectores de la población global.

Se calcula que para el 2050, la producción agrícola tendrá que incrementarse en 50 % para alimentar a la población mundial proyectada en más de 9,700 millones de personas (Foley *et al.*, 2014; FAO, 2012). Y se prevé que el impacto ambiental causado por la “carnificación” de nuestras dietas, la cual se ha acelerado desde los años 1960, se incrementará como resultado no solo del crecimiento poblacional sino también del acceso generalizado a alimentos de origen animal producidos a escala industrial y de “bajo costo” monetario, aunque muy alto en términos ambientales y de bienestar animal (Weis, 2013). Esto implicará un estrés adicional sobre la atmósfera, los animales y los recursos naturales que sustentan nuestras dietas, principalmente tierra y agua. Un escenario preocupante en el contexto actual del cambio climático, el cual nos obliga a implementar urgentemente medidas para transitar hacia economías con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> si queremos mantener la temperatura del planeta por debajo del 1.5°C (IPCC, 2021).

**Las actividades agrícolas y ganaderas tienen un alto impacto ambiental y son responsables de la generación de cerca de un tercio de los gases de efecto invernadero que emitimos anualmente a la atmósfera.**





La construcción de sistemas agroalimentarios más sustentables requiere la implementación simultánea de diversas acciones, entre otras: la reducción considerable en el consumo de productos de origen animal; el incremento en la producción orgánica y agroecológica; la prohibición de la extensión de tierras agrícolas y ganaderas sobre bosques y selvas; la reducción de los desperdicios en la cadena de producción y de desechos generados por los consumidores; la implementación de técnicas más sustentables para trabajar el suelo; y el uso de tecnologías y métodos más eficientes en la cadena de distribución y venta, incluyendo el uso de energías no fósiles (Mueller, 2017; Schiermeier, 2019; Barbieri *et al.*, 2021). Ninguna de estas acciones por sí solas es suficiente, pero en conjunto nos permitirán reducir el impacto ambiental de nuestras dietas.

## **Semillas y derechos de propiedad intelectual en el contexto de cambio climático**

Las semillas son un componente vital de nuestros sistemas agroalimentarios. Son la base genética de los cultivos que alimentan a los humanos y a los animales que consumimos. Más allá de su función como insumo agrícola, las semillas también concentran la historia de la agricultura y la evolución de las civilizaciones que han dado vida a los cultivos que hoy sustentan a la humanidad.

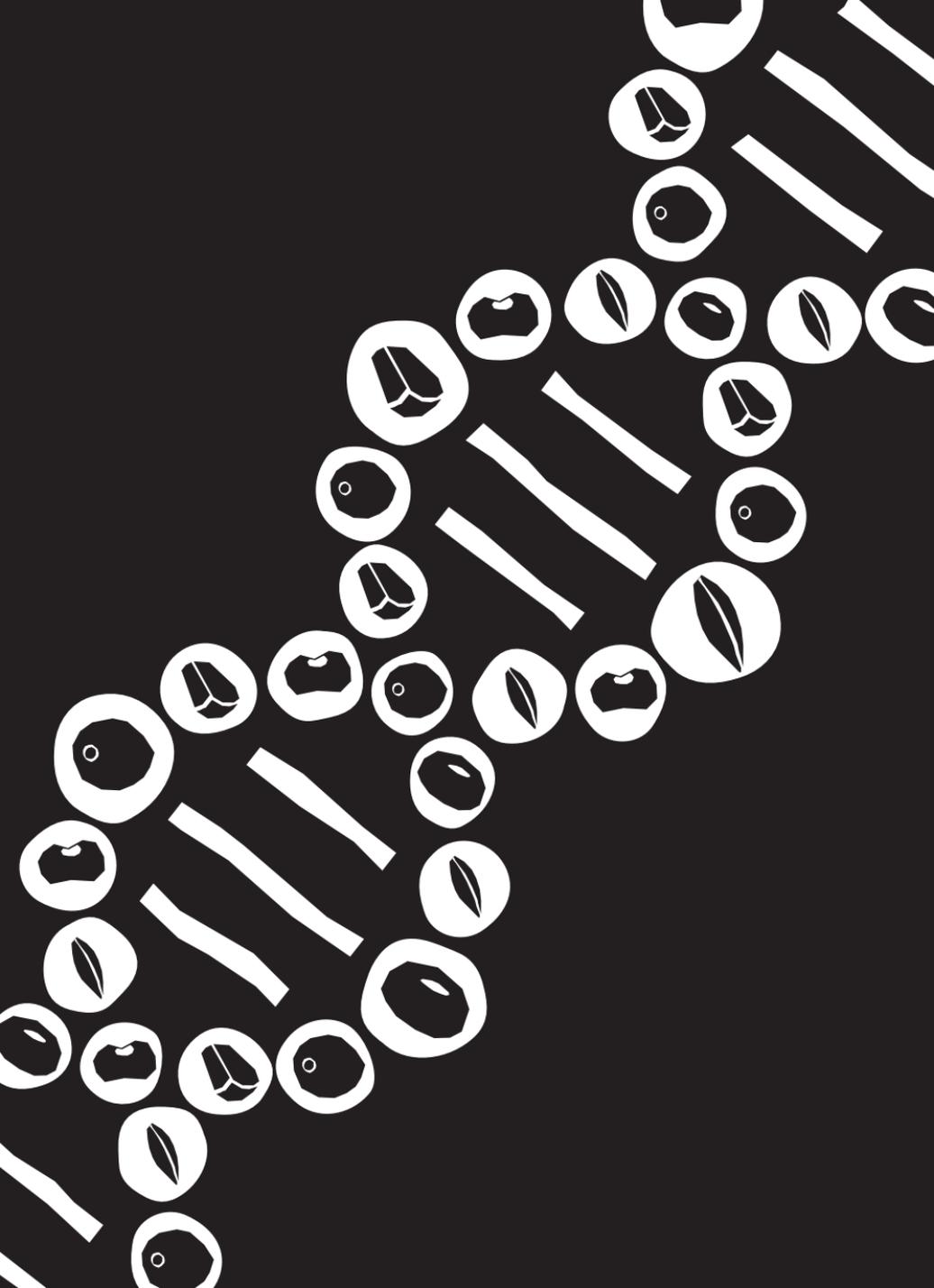
Actualmente, tan solo cuatro corporaciones agroalimentarias controlan poco más de dos tercios del mercado mundial de semillas y agroquímicos. En 1985, las cuatro corporaciones líderes compartían menos de una décima parte de ese mercado (Bonny, 2017; Howard, 2023). Esta concentración de poder corporativo es resultado de un conjunto de procesos que se han desarrollado a nivel global en las últimas décadas. Entre los más sobresalientes podemos mencionar:

la privatización o desmantelamiento de las instituciones nacionales dedicadas al fitomejoramiento; la liberalización de los sectores agroalimentarios y de semillas en los países del sur; la formalización de un régimen internacional de derechos de propiedad intelectual sobre el germoplasma a través del Acuerdo sobre los Aspectos de los Derechos de Propiedad Intelectual Relacionados con el Comercio (TRIPS Agreement) de la Organización Mundial del Comercio (WTO) y la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV); la proliferación de los Organismos Genéticamente Modificados (OGM) como tecnologías patentadas ; y la rápida fusión de compañías dedicadas a las semillas y los agroquímicos (Hernández Rodríguez, 2022). Hoy en día, alrededor del mundo, las semillas, la agricultura y los sistemas alimentarios están conectados en algún grado con las siguientes corporaciones: la alemana Bayer Crop Science, la estadounidense Corteva, la china Chemchina y la francesa Vilmorin & Cie/ Limagrain (ETC Group, 2019).

En respuesta a la acelerada concentración de poder corporativo sobre las semillas y la agricultura, ha surgido un movimiento social global en torno a la defensa de la soberanía de semillas (Hernández Rodríguez, 2022). La activista Vandana Shiva (2022) afirma que el concepto de soberanía de semillas concibe la biodiversidad, incluyendo la agrobiodiversidad, como un bien común público que no debe ser privatizado. De acuerdo con Adhikari (2014), la semilla es el primer enlace de la cadena alimentaria y la soberanía de los agricultores sobre las semillas es el fundamento de la soberanía alimentaria. Peshchard y Randeria (2020) definen el activismo por la defensa de las semillas como todas las acciones que se oponen a la privatización de las semillas y defienden el derecho individual y colectivo a estas. Por su parte, Kloppenburg (2014) hace una conceptualización de este movimiento y distingue entre (1) sus *dimensiones constitutivas*, como

**"Actualmente, tan solo cuatro corporaciones agroalimentarias controlan poco mas de dos tercios del mercado mundial de semillas y agroquímicos".**





son los derechos a guardar, replantar e intercambiar semillas; usar las semillas para crear nuevas variedades; y participar en el desarrollo de políticas públicas concernientes a las semillas y la agricultura; (2) sus *plataformas clave de oposición*, esencialmente a los derechos de propiedad intelectual y los OGM; y (3) sus *orientaciones afirmativas*, entre otras, resguardo e intercambio comunitarios de semillas, agroecología y fitomejoramiento participativo, y alianzas entre campesinos, ciudadanos, ONG y científicos.

La evolución de este proceso dual (la concentración de capital sobre las semillas y el surgimiento de un movimiento social que se opone a ese proceso privatizador) indica una confrontación creciente entre dos modelos antagónicos para el manejo de los recursos fitogenéticos (Hernández Rodríguez, 2022). Por una parte, la conceptualización y el manejo de las semillas como un bien común que debe estar en manos de los agricultores y la sociedad, como ha sucedido desde el origen de la agricultura hace más de 10,000 años. Por otra parte, la conceptualización de las semillas como una tecnología altamente especializada, producida por científicos en los laboratorios y regulada por derechos de propiedad intelectual como una mercancía. Esta confrontación, generada particularmente por la implementación de derechos de propiedad intelectual y el desmantelamiento de los programas de apoyo a la agricultura campesina, ha vulnerado profundamente la relación de complementariedad entre los sistemas de semillas campesinos e industriales (Kingsbury, 2009; Curry, 2022; Kloppenburg, 2004).

Esta polarización política es altamente peligrosa en el contexto del cambio climático, específicamente para los países del sur. Ante un futuro incierto con variaciones climáticas aceleradas sin precedentes, se requiere de la implementación simultánea y coordinada de múltiples acciones de mitigación y adaptación que abarquen tanto a la

agricultura campesina como a la industrial. Por una parte, se requieren acciones concretas para proteger la agrobiodiversidad en manos de los campesinos. Es imposible saber con precisión qué recursos genéticos serán capaces de adaptarse a las variaciones climáticas por venir. Entre más amplia sea la reserva de recursos fitogenéticos en manos de los agricultores, mayores son las oportunidades de que diversos sistemas agrícolas de subsistencia se adapten al cambio climático, al menos parcialmente (Mercer & Perales, 2010; Bellon & van Etten, 2013). Como lo señala la FAO (2021), la agricultura campesina también requiere la activación de apoyos gubernamentales para la mitigación y adaptación, lo cual debe incluir proyectos de fitomejoramiento participativos que favorezcan una colaboración entre campesinos y profesionales agrícolas y una interacción activa entre los sistemas de semillas campesinos e industriales. El desmantelamiento de las instituciones públicas de fitomejoramiento y la implementación de derechos de propiedad intelectual sobre las semillas industriales aminoran este tipo de colaboración.

Respecto a la agricultura industrial, los países del sur son altamente vulnerables por su limitado o nulo control sobre el desarrollo científico y tecnológico del cual depende la producción agrícola. Más del 80 % de las patentes sobre las variedades vegetales, usadas en la agricultura industrial, están concentradas en los países del norte, específicamente en la Unión Europea, China y Estados Unidos (UPOV, 2022). El desarrollo tanto de los OGM como de las nuevas variedades basadas en la edición genética a través de CRISPR (en español, repeticiones palindrómicas cortas, agrupadas y regularmente interespaciadas) tiene lugar en esos países, y los derechos de propiedad intelectual han hecho imposible la implementación de programas de cooperación norte-sur para la transferencia de estas tecnologías. Es interesante que algunos de los científicos involucrados en el desarrollo de CRISPR,

**"Entre más amplia sea la reserva de recursos fitogenéticos en manos de los agricultores, mayores son las oportunidades de que diversos sistemas agrícolas de subsistencia se adapten al cambio climático, al menos parcialmente".**





notoriamente Jennifer Doudna, están impulsando un nuevo debate sobre la necesidad de democratizar la edición genética (Doudna & Sternberg, 2017). Aunque aún es muy pronto para saber si realmente existe la voluntad política de democratizar CRISPR, el surgimiento de este debate dentro de la comunidad científica es muy relevante y demuestra que la movilización social internacional en contra de los OGM y las patentes ha sido parcialmente exitosa.

El cambio climático nos obliga a repensar los esquemas de poder implícitos en el sistema de patentes y a restablecer las relaciones de cooperación norte-sur. Por consiguiente, los países del sur deben reactivar las inversiones en el desarrollo de instituciones nacionales para la investigación agrícola y el fitomejoramiento con un nuevo énfasis en adaptación y mitigación de cambio climático tanto para el sector industrial como el campesino. La conservación de la agrobiodiversidad y la seguridad alimentaria de millones de personas, particularmente en las zonas rurales de los países del sur, dependen de la creación de políticas agrarias integrales con un enfoque de sustentabilidad y justicia redistributiva.

## **Conclusiones sobre cómo construir sistemas agroalimentarios más sustentables y justos**

La emergencia climática en la que nos encontramos inmersos ha hecho evidente que nuestra forma de habitar el planeta es insostenible y éticamente incorrecta. Nuestros sistemas agroalimentarios, y el paradigma de desarrollo que los sustenta, son altamente destructivos de los ecosistemas y requieren de la esclavitud y muerte de miles de millones de animales no humanos (Sanders, 2020). A esto debemos agregar los desequilibrios de poder entre los países del norte y el sur en toda la cadena agroalimentaria, las precarias condiciones laborales

de una gran proporción de los trabajadores agrícolas, y las profundas desigualdades en el acceso a los alimentos (tanto en cantidad como en diversidad y calidad) entre distintos sectores de la población (Bello, 2009; Marya & Patel, 2021).

A lo largo de este ensayo, he señalado algunas medidas concretas que pueden favorecer la creación de sistemas agroalimentarios más sustentables y justos. Aquí sintetizo las principales ideas. El primer requerimiento es reconocer que no existe una sola solución al problema que sea suficiente, y que se necesita la implementación simultánea y coordinada de varias iniciativas que contemplen tanto a la agricultura industrial como a la campesina.

En el área de sostenibilidad, por ejemplo, se debe dar prioridad a aquellos proyectos que reduzcan considerablemente las emisiones de GEI y el uso de recursos naturales. Algunos ejemplos serían la reducción drástica en el consumo de alimentos de origen animal, la prohibición de la expansión de las tierras agrícolas y ganaderas sobre bosques y selvas, la transición parcial hacia modelos agrícolas orgánicos y agroecológicos dentro de las posibilidades de disponibilidad de nitrógeno y tierra, y el uso de energías no fósiles.

En el área de agrobiodiversidad, se deben fortalecer los sistemas de semillas integrados, dando prioridad a la colaboración entre comunidades campesinas y profesionales agrícolas en el marco de proyectos de conservación (*in situ* y *ex situ*) y fitomejoramiento participativo. Esto requerirá un restablecimiento de las instituciones nacionales dedicadas a la investigación agrícola y el fitomejoramiento, así como la reactivación de subsidios y programas de desarrollo para la agricultura campesina.

Otro elemento importante es la reactivación de las relaciones de cooperación y transferencia de conocimiento y tecnología agrícola entre el norte y el sur, para lo cual habrá que reflexionar sobre los

riesgos que conllevan los derechos de propiedad intelectual en el contexto del cambio climático, particularmente para los países del sur global que son altamente dependientes de los insumos agrícolas que suministran las corporaciones transnacionales. No se trata de aprobar subsidios para importar insumos agrícolas, como el modelo que se ha propuesto para la nueva Revolución Verde en África respecto a los OGM. El reto es poner en marcha procesos de generación y transferencia de conocimientos que permitan la colaboración efectiva para el diseño de proyectos de mitigación y adaptación, con un énfasis en minimizar las altas pérdidas de productividad agrícola que se proyectan para los países del sur, tanto en el sector industrial como campesino.

El carácter global de la crisis climática requiere de políticas globales que ayuden a prevenir las crisis humanitarias y ambientales que se esperan en los siguientes años, las cuales si bien estarán mayoritariamente localizadas en los países del sur, terminarán afectando a los países del norte a través de la migración y la desestabilidad política y económica. La actual hiperconcentración de poder corporativo sobre las semillas y los sistemas agroalimentarios, la cual no tiene precedentes en la historia de la agricultura, vulnera cualquier posibilidad de autonomía y de colaboración significativa entre el norte y el sur en términos de políticas agrícolas frente al cambio climático. Se requiere voluntad política por parte de los países del norte para implementar medidas antimonopólicas en el sector agroalimentario, así como para impulsar la cooperación internacional y la “democratización” de la tecnología. Por su parte, los países del sur requieren alejarse parcialmente de las políticas neoliberales y restablecer un grado de autonomía para implementar políticas agroalimentarias adecuadas, particularmente en apoyo a la agricultura campesina, la conservación de agrobiodiversidad y la investigación agrícola y de fitomejoramiento frente al cambio climático.

Las movilizaciones sociales en torno a los conceptos de soberanía de semillas y soberanía alimentaria han abierto un debate fundamental sobre la necesidad de construir sistemas agroalimentarios más sustentables y justos. La “democratización” de la edición genética como lo ha propuesto Jennifer Doudna, no podría explicarse sin la oposición política masiva a nivel internacional que generaron los OGM, al ser introducidos al mercado como tecnologías patentadas y promovidos de forma antidemocrática a través de los tratados de libre comercio. De igual manera, los movimientos sociales han jugado un papel central en la definición de políticas públicas para la conservación de la agrobiodiversidad. Un ejemplo exitoso específico es México con el movimiento Sin maíz no hay país, gracias al cual debemos la mayoría de las políticas actuales referentes a la protección del maíz nativo y la prohibición del glifosato y los OGM. Aunque la sociedad civil no tiene los instrumentos suficientes para modificar las actuales estructuras de poder, su papel sigue siendo crucial y el tema del cambio climático debe integrarse activamente a las agendas políticas de las organizaciones civiles y los movimientos sociales. La sociedad civil debe continuar su oposición al control monopólico sobre los sistemas agroalimentarios y defender el derecho de las naciones y sus comunidades a la soberanía alimentaria y de semillas.



## Referencias

- Adhikari, J. (2014). Seed sovereignty: Analysing the debate on hybrid seeds and GMOs and bringing about sustainability in agricultural development. *Journal of Forests and Livelihood* 12(1), 33-46. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.011>
- Bar-On, Y, Phillips, R., & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *PNAS*, 115(25), 6506-6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.171184211>
- Barbieri, P., Pellerin, S., Seufert, V., Smith, L., Ramankutty N., & Nesme, T. (2021). Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. *Nature Food* 2, 363-372. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00276-y>
- Bello, W. (2009). *The food wars*. Verso Books.
- Bellon, M. & van Etten, J. (2013). Climate change and on-farm conservation of crop landraces in centers of diversity. In Jackson, M., Ford-Lloyd, B., and Parry, M. L. (eds), *Plant Genetic Resources and Climate Change* (pp. 137-150). CABI Publishing.
- Bellon, M., Mastretta-Y., A., Ponce-M., A., Ortiz-S., D., Oliveros-G., O., Perales, H., Acevedo, f., Sarukhán, F. (2018). Evolutionary and food supply implications of ongoing maize domestication by Mexican campesinos. *Proceedings of the Royal Society B*, 285: 20181049.
- Bonny, S. (2017). Corporate concentration and technological change in the global seed industry. *Sustainability* 9(9), 1-25. <https://doi.org/10.3390/su9091632>
- Centro Geo. (2023). *Territorios de maíz*. [http://adesur.centrogeo.org.mx/cms/multimedia/territorios\\_maiz/menuSect-31-780](http://adesur.centrogeo.org.mx/cms/multimedia/territorios_maiz/menuSect-31-780)
- Coomes, O., McGuire, S., Garine, E., Caillon, S., McKey, D., Demeulenaere, E., Jarvis, D., Aistara, G., Barnaud, A., Clouvel, P., Emperarire, L., Louafi, S., Martin, P., Massol, F., Pautasso, M., Violon, C., & Wancélious, J. (2015). Farmer seed networks make a limited contribution to agri-

- culture? Four common misconceptions. *Food Policy* 56, 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2015.07.008>
- Curry, H. (2022). *Endangered Maize. Industrial Agriculture and the Crisis of Extinction*. University of California Press.
- Doudna, J. & S. Sternberg. (2017). *Una grieta en la Creación. CRISPR, la edición genética y el increíble poder de controlar la evolución*. Alianza Editorial.
- ETC Group. (2019). *Plate techtonics. Mapping corporate power in big food. Corporate concentration by sector and industry rankings by 2018 revenue*. ETC Group <https://www.etcgroup.org/content/plate-tech-tonics>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2021). *Small family farmers produce a third of the world's food*. FAO. <https://www.fao.org/news/story/en/item/1395127/icode/>
- FAO. (2016). *Climate change and agriculture: Strengthening the role of smallholders*. <https://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/450264/>
- FAO. (2012). *World Agriculture Towards 2030/2050. The 2012 Revision*. ESA Working Paper No. 12-03. <http://www.fao.org/docrep/016/ap106e/ap106e.pdf>
- FAO. (2011a). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture. Managing systems at risk*.
- FAO. (2011b). *Global Food Losses and Food Waste. Extent, Causes and Prevention*.
- Foley, J., Steinmetz, G., & Richarson, J. (2014). *Feed the world. Where will we find enough food for 9 billion?* National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com/foodfeatures/feeding-9-billion/>
- Harris, D. (1990). Vavilov's concept of centres of origin of cultivated plants: Its genesis and its influence on the study of agricultural origins. *Biological Journal of Linnean Society* 39(1), 7-16. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.1990.tb01608.x>
- Hernández Rodríguez, C. (2022). Seed sovereignty as decommodification: a perspective from subsistence peasant communities in Southern Mexico. *Journal of Peasant Studies* <https://doi.org/10.1080/03066150.2022.2>

[025780](#)

- Hernández Rodríguez, C. (2021). *Semillas, agricultura y cambio climático*. Presentación para el seminario Agricultura y Cambio Climático en México del Programa de Investigación en Cambio Climático. [https://www.facebook.com/watch/live/?ref=watch\\_permalink&v=187644203448187](https://www.facebook.com/watch/live/?ref=watch_permalink&v=187644203448187)
- Howard, Philip. (2023). *Global seed industry changes since 2013*. Philip H. Howard.net <https://philhoward.net/2018/12/31/global-seed-industry-changes-since-2013/>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
- IPCC. (2019). *Climate change and land: an IPCC special report on greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- ISAAA (International Service for the Acquisition of Agribiotech Applications). (2019). *Global status of commercialized biotech/GM crops in 2018: Biotech crops continue to help meet the challenges of increased population and climate change*. ISAAA. <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/55/default.asp>
- Jackson, M., Ford-Lloyd, B., & Parry, M. L. (eds). (2013). *Plant Genetic Resources and Climate Change*. CABI Publishing.
- Kingsbury, N. (2009). *Hybrid. The history of plant breeding*. The University of Chicago Press
- Kloppenborg, J. (2014). Re-purposing the Master's tools: The Open Source Seed Initiative and the struggle for seed sovereignty. *Journal of Peasant Studies* 41(6), 1225-1246. <https://doi.org/10.1080/03066150.2013.875897>
- Kloppenborg, J. (2004). *First the seed. The political economy of plant biotech-*

- nology*. The University of Wisconsin Press.
- Lowder S., Sánchez M., & Bertini, R. (2021). Which farms feed the world and has farmland become more concentrated? *World Development* 142. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X2100067X?via%3Dihub>
- Louwaars, N. & Simon de Boef, W. (2012). Integrated seed sector development in Africa: A conceptual framework for creating coherence between practices, programs, and policies. *Journal of Crop Improvement* 26(1), 39-59. <https://doi.org/10.1080/15427528.2011.611277>
- Marya, R. & Patel, R. (2021). *Inflamed: Deep Medicine and the Anatomy of Injustice*. Farrar, Straus and Giroux.
- Mercer, K. & Perales, H. (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%2Fj.1752-4571.2010.00137.x>
- Mercer, K., Perales, H., & Wainwright, J. (2012). Climate change and the transgenic adaptation strategy: Smallholder livelihoods, climate justice, and maize landraces in Mexico. *Global Environmental Change* 22(2), 495-504. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.01.003>
- Morton, J. (2007). The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *Proceedings of the national academy of sciences*, 104(50), 19680-19685.
- Mueller, A., Schader, C., El-Hage Scialabba, N., Brüggemann, J., Isensee, A., Heinz Erb, K., Smith, P., Klocke, P., Leiber, F., Stolze, M. & Niggli, U. (2017). Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nature Communications* 8(1290), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01410-w>
- Myers, N., Mittermeier, R., Mittermeier, C., de Fonseca G. & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853-858.
- Pautasso, M., Aistara, G., Barnaud, A., Caillon, S., Clouvel, P., Coomes, O., Delêtre, M., Demeulenaere, E. De Santis, P., Döring, T., Eloy Ludivine,

- Emperaire, L., Garine, E., Goldringer, I., Jarvis, D., Joly, H., Leclerc, C., Louafi, S., Martin, P., ... & Tramontini, S. (2013). 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>
- Peschard, K. & Randeria, S. (2020). “Keeping seeds in our hands”: The rise of seed activism. *Journal of Peasant Studies* 47(4), 613-647. <https://doi.org/10.1080/03066150.2020.1753705>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392): 987-992. DOI: 10.1126/science.aag0216
- Ritchie, H. (2021a). *Smallholders produce one-third of the world’s food, less than half of what many headlines claim*. OurWorldInData.org. <https://ourworldindata.org/smallholder-food-production>
- Ritchie, H. (2021b). *How much of global greenhouse gas emissions come from food?* OurWorldInData.org <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions-food>
- Ritchie, H. (2019). *Food production is responsible for one-quarter of the world’s greenhouse gas emissions*. OurWorldInData.org. <https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions>
- Ritchie, H., P. Rosado & M. Roser. (2022). *Environmental impacts of food production*. OurWorldInData.org. <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food#citation>
- Sanders, B. (2020). *Global animal slaughter statistics & charts: 2020 update*. Faunalytics <https://faunalytics.org/global-animal-slaughter-statistics-and-charts-2020-update/>
- Schiermeier, Q. (2019). *Eat less meat: UN climate-change report calls for change to human diet*. Nature News <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02409-7>
- Shiva, V. (2022). *Seed sovereignty*. Lexicon of Food. <https://www.seedsovereignty.info/>

- UPOV (International Union for the Protection of New Varieties of Plants). (2022). *Top 10 UPOV members by number of PBR titles issued (1999-2020)*. UPOV. <https://www.upov.int/databases/en/>
- Weis, T. (2013). The Ecological Hoofprint. *The Global Burden of Industrial Livestock*. Zed Books.

Este libro *Agricultura y cambio climático* de la colección *¿Qué sabemos del cambio climático en México?* se terminó en diciembre de 2024 en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México.

# ¿Cómo afecta el cambio climático en la agricultura de México?

**E**l Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su reporte publicado en febrero de 2022 (IPCC, 2022), indica que, en varias áreas del mundo, la agricultura ya presenta estrés hídrico, y que la situación se exacerbará en las áreas secas, y en países de bajos ingresos. A pesar de la importancia del sector agrícola en México, los estudios que han analizado los impactos del cambio climático en este sector aún son limitados, y sobre todo carecen de propuestas concretas que permitan priorizar áreas para el desarrollo de estrategias de adaptación. Este volumen ofrece una visión general de los impactos del cambio climático y de en la agricultura de México y de posibles medidas de adaptación en algunos cultivos.

El Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) inició en 2021 el ciclo de conferencias y conversatorios ¿Qué sabemos del cambio climático en México? que han dado lugar a esta colección.

En ¿Qué sabemos del cambio climático en México? expertos de distintas disciplinas científicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de otras instituciones académicas del país, abordan distintos aspectos del cambio climático con una visión multidisciplinaria e integral de este fenómeno global y de importancia para el país.

Colección dirigida por el Dr. Francisco Estrada Porrúa.

ISBN colección: 978-607-30-8709-4

ISBN volumen: 978-607-30-9923-3

<https://www.pincc.unam.mx>

