

Informe Final

Proyecto

Impactos de la sequía pasada y futura en el sector agrícola de México

Apoyo PINCC 2023

Responsable

Dr. Guillermo N. Murray Tortarolo

Investigador Titular “A” TC

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad

UNAM, Campus Morelia

Marzo 2025

Resumen

Actualmente vivimos una época de cambio climático. Las actividades antropogénicas han liberado cantidades masivas de gases de efecto invernadero a la atmósfera terrestre, lo que ha traído consigo un aumento en la temperatura global y su ulterior efecto en cascada sobre todo el clima. En particular, se ha alterado la velocidad e intensidad del ciclo hidrológico global, llevando a un aumento de los eventos hidrometeorológicos extremos. La sequía, se ha vuelto un fenómeno más intenso, recurrente y duradero en nuestro planeta, particularmente en sistemas semisecos. Las consecuencias de lo anterior se dejan ver en los ecosistemas, pero sobre todo en las sociedades humanas. Se han registrado impactos de las fuertes sequías recientes a nivel global en la producción de alimentos, la disponibilidad de agua urbana, la generación de energía, por mencionar algunos sectores. Lo anterior deriva en consecuencias para las sociedades, tales como pérdidas de empleos, deserción escolar y migración.

Por sus características geográficas y socioeconómicas, México es un país sumamente vulnerable al cambio climático. En particular, las sequías pasadas han tenido serios impactos en la producción agrícola de temporal, las poblaciones ganaderas, la migración humana, por mencionar algunos. No obstante, desconocemos muchos de los impactos que ha tenido y podrá tener en una plétora de sectores. El objetivo de este trabajo fue investigar las relaciones entre las sequías recientes (1980-2023), la producción de alimentos y la sociedad nacional.

Encontramos un aumento en la intensidad y recurrencia de las sequías en las últimas cuatro décadas, en comparación con el resto del siglo XX. En particular, dos de las peores sequías de toda la historia de nuestra nación ocurrieron en los últimos años (2011 y 2021-2023). Lo anterior posiblemente se atribuye a un aumento en la evapotranspiración potencial terrestre y una disminución en la cobertura de nubes, más que a cambios abruptos en la precipitación. Estudiamos las consecuencias de estos eventos en distintos sectores. En el llenado de presas nacional encontramos el mínimo histórico durante los eventos extremos de 2023; en términos de los aumentos térmicos de los últimos años, hacemos notar que la sequía ocasionada por la salida de agua (evapotranspiración) es la mayor de toda la historia moderna de México; y finalmente relacionamos la variabilidad de la lluvia con la pérdida del empleo en el agro nacional, mostrando una salida importante de las actividades ganaderas y de agricultura de temporal durante años secos.

1. La interrelación de la agricultura y el clima

La gran mayoría de los cultivos que consumimos los seres humanos se domesticaron en los últimos 15,000-10,000 años. Esto es cierto para el maíz (Matsuoka et al. 2002; Kistler et al. 2020), el trigo (Heun et al. 1997) y el arroz (Li et al. 2006), por mencionar algunos. Una de las explicaciones teóricas de esta convergencia temporal es el cambio en el clima mundial a raíz del término de última glaciación (hace 21,000 años aproximadamente) (Fueller et al. 2014). El mismo dio como resultado una expansión de la duración de la época de sequía y, junto con ello, la proliferación de plantas anuales de rápido crecimiento (Donald & Hamblin 1983). Estas plantas, en su mayoría gramíneas, fueron domesticadas por los humanos y constituyen parte de las dietas actuales a nivel mundial. Esto tuvo como resultado un importante incremento en la población humana global y generó un sistema de producción de alimentos altamente susceptible a la variación climática (Gupta 2004).

Esta dependencia de la agricultura con respecto al clima sigue siendo una realidad en la actualidad, pese a los avances tecnológicos. En este sentido, en el mundo moderno el 75% del área agrícola se dedica a la agricultura de temporal (Portman et al. 2010) y el 90% de las praderas no tienen ningún tipo de riego (Leff et al. 2004), en otras palabras, dependen directamente del clima. Los impactos del clima se evidencian en la investigación reciente de los patrones climático-productivos. Por ejemplo, la investigación de Lesk et al. (2016) mostró que durante 1964-2007 la sequía redujo en promedio la producción agrícola global en 9-10%. En el caso del ganado, Murray-Tortarolo & Jaramillo (2020) mostraron que los extremos de precipitación, tanto sequías como inundaciones, afectan a las poblaciones ganaderas globales, un patrón multiescalar que se repite entre naciones.

Con base en lo anterior, se deriva que el cambio climático representa un riesgo global para la producción agrícola, efecto que se evidencia en décadas recientes y en proyecciones futuras. Por ejemplo, en el trabajo de Iizumi & Ramankutty (2015) se muestra que los impactos del cambio climático en la producción agrícola de décadas recientes (1981-2010) son cuantificables espacialmente, con una disminución particularmente extensa en el rendimiento de maíz y de soya.

2. Consecuencias del cambio climático en la producción agrícola de México

Variación climática en México

El cambio climático en México ha llevado a un aumento en la temperatura promedio de 1.1°C en el último siglo (Bernal et al. 2024) y, pese a no existir cambios detectables en la precipitación promedio anual nacional, se registran estaciones secas con un mayor déficit hídrico y las estaciones húmedas con un aumento (Murray-Tortarolo 2021). Así mismo, se ha cuantificado un aumento en la duración e intensidad de las sequías, mismo que se espera se intensifique a futuro (Murray-Tortarolo et al. 2020). Los escenarios futuros modelados recientemente también muestran un cambio en la estacionalidad de la precipitación debido al retraso del monzón, un aumento de las lluvias invernales y de los ciclones tropicales (IPCC 2021), todo esto acompañado de un incremento en la temperatura media y los eventos de ondas de calor, que favorecerán las sequías de verano y las inundaciones al final de la época de lluvias (IPCC 2021).

Estructura de la agricultura en México y su riesgo frente al cambio climático

La agricultura, la ganadería y la silvicultura mexicanas son particularmente vulnerables frente al cambio climático. De los 198 millones de hectáreas que tiene el país, 115 millones (58%) son de agostadero dedicado al libre pastoreo, 45.5 millones tienen bosques aprovechados en algún nivel (23%) y 27.4 millones (14%) están destinados a la producción agrícola. De esta última la agricultura de temporal representa el 80% (22 millones de hectáreas) y los cultivos anuales representan el 72% del área total sembrada (19.7 millones) (INEGI, encuesta nacional agropecuaria, 2019). Esto significa que al menos el 92% del territorio está dedicado a actividades que dependen directamente del clima (pastoreo, agricultura de temporal anual y manejo forestal). Por lo tanto, la alteración de éste -en cualquiera de las formas mencionadas con antelación- tendrá como resultado una afectación en el rendimiento de las parcelas agrícolas, ganaderas y forestales, con los subsecuentes impactos para la población que depende directamente de éstas. Si bien las consecuencias pueden ser tanto benéficas como dañinas, las segundas parecen dominar los patrones productivos actuales (Iizumy & Ramankutty 2016; Murray-Tortarolo et al. 2018; Estrada et al. 2023).

De igual manera, el tipo de actividad agropecuaria dominante en cada región es dependiente del clima. Como mostraron Murray-Tortarolo et al. (2018), existe una relación entre la duración de la época de sequía y la forma de manejo agropecuario. Por ejemplo, los lugares con estaciones de sequía reducidas tienden a mostrar un manejo de pastizales inducidos para el pastoreo del ganado; en cambio, en los sitios con una duración del estiaje extenso se recurre a la agricultura de riego, dejando a la agricultura de temporal en sitios que tienen una época de lluvias de 4-7 meses. Esto muestra la profunda dependencia del manejo agropecuario en territorios con características diferenciales de predictibilidad de la estacionalidad climática y el riesgo que implica la alteración de ésta, por ejemplo, con el esperado retraso del monzón mexicano como consecuencia del cambio climático.

Estudios recientes y faltantes de información

Existe una plétora de estudios sobre los efectos del cambio climático en ciertos cultivos de México. No obstante, la mayoría de éstos se centran en el ámbito local o regional (p.ej. Arce-Romero et al. 2020; Gay et al. 2006), con pocos trabajos de patrones a nivel nacional y todos éstos enfocados sobre las tendencias climáticas. Dentro de los mismos destacan aquellos realizados en cereales. Por ejemplo, Murray-Tortarolo et al. (2018) evaluaron el impacto de las tendencias futuras de la precipitación en la producción nacional de maíz de temporal, encontrando una disminución potencial de entre 5-10% en el rendimiento para 2100. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Ureta et al. (2020). Para el caso del trigo, Hernández-Ochoa et al. (2018) encontraron una disminución de hasta el 32% en la producción de temporal para finales de siglo, debido principalmente a una disminución en la precipitación. Existe también el trabajo de Estrada et al. (enviado) quienes analizan el impacto del cambio climático en siete cultivos de México hacia el 2100, encontrando una disminución en el rendimiento esperado de maíz, trigo, caña de azúcar, cebada, avena y arroz.

Pese a la importancia de los trabajos mencionados, existe un amplio vacío de información sobre el impacto del cambio climático en la producción agrícola en México. Por ejemplo, no se conocen las consecuencias de largo plazo que tendrá sobre cultivos de vital importancia económica o ampliamente extendidos, como frutales y hortalizas (p.ej. el aguacate, los jitomates, el frijol). Ignoramos el impacto diferencial que podría tener sobre

cultivos anuales y perennes. También desconocemos el impacto diferencial en la agricultura de temporal y de riego a nivel nacional, particularmente de los eventos climáticos extremos tales como ondas de calor y sequías -pronosticadas a intensificarse en el futuro-.

Finalmente, el impacto del cambio en la estacionalidad climática sobre el rendimiento de los cultivos, tal como el inicio retrasado de la época de lluvias debido al pronosticado debilitamiento del monzón mexicano, no se ha abordado en ningún estudio.

Impactos de la sequía sobre la sociedad

Adicionalmente a lo anterior, los impactos sobre la agricultura tienen un efecto sobre la sociedad. Por ejemplo, Murray-Tortarolo & Martínez-Salgado (2020) probaron que la sequía, a través de sus consecuencias en los bajos rendimientos agrícolas de temporal, era uno de los motores más importantes de la migración nacional hacia EUA. Arceo et al. (2021) mostraron los impactos de la falta de agua sobre la deserción escolar en infantes, particularmente en estados del norte de México. Pese a ello aún desconocemos la mayor parte de los impactos de la sequía en el entramado social.

Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo fue estudiar los impactos de la sequía en México, tanto en décadas pasadas como en proyecciones futuras. En particular, centramos nuestra atención en comprender sus impactos sobre el agro mexicano, tanto en términos de producción, como de factores demográficos.

Resultados derivados del proyecto

Tesis

- Karla Arlae Guijosa. Con el proyecto “Consecuencias de la variabilidad climática en la ocupación agraria de México”. Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM. En conjunto con el Dr. Mario Martínez Salgado de la UDIR. Graduación 16 de enero de 2024.
- Rafael Bernal Hernández. Con el proyecto “Cambio climático en años recientes en México”. Licenciatura en Ciencias Ambientales, ENES, UNAM. 03 de diciembre de 2024

Artículos Científicos en Revistas Indizadas

- Sánchez Guijosa, K. A., Murray-Tortarolo, G., & Martínez Salgado, M. (2025). The impact of climate variability on agricultural employment in Mexico from 1980–2017. PloS one, 20(2), e0313891. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313891>

Artículos de Divulgación

- Bernal-Hernández R & Murray-Tortarolo, G. Aumento en las temperaturas: una realidad ineludible en México. Revista Nexos. Noviembre, 2024. <https://medioambiente.nexos.com.mx/aumento-en-las-temperaturas-una-realidad-ineludible-en-mexico/>
- Murray Tortarolo, G. ¿Qué esperar del clima en México? Revista Nexos. Febrero, 2025. <https://medioambiente.nexos.com.mx/que-esperar-del-clima-en-mexico-en-2025/>
- Murray-Tortarolo, G. N., Ponce, A. M., Salgado, M. M., & Guijosa, K. S. (2024). Cambio climático y el agro mexicano: desafíos alimentarios. Revista Digital Universitaria, 25(4). https://www.revista.unam.mx/2024v25n4/cambio_climatico_y_el_agro_mexicano_desafios_alimentarios/

Artículos en proceso

- Murray-Tortarolo et al. En proceso. Past, present and future of Drought in Mexico.
- Murray-Tortarolo et al. En proceso. The large impact of recent droughts on Mexican agriculture
- Tejeda et al. En proceso. Future climate scenarios for Mexico: an análisis of CMIP6 models.

Referencias

- 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.
- Ahmed, S., Orians, C. M., Griffin, T. S., Buckley, S., Unachukwu, U., Stratton, A. E., ... & Kennelly, E. J. (2014). Effects of water availability and pest pressures on tea (*Camellia sinensis*) growth and functional quality. *AoB Plants*, 6.
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A., Frei, C., Goyette, S., ... & Woth, K. (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic change*, 81(1), 71-95.
- Bindoff, N. L., Stott, P. A., AchutaRao, K. M., Allen, M. R., Gillett, N., Gutzler, D., ... & Zhang, X. (2013). Detection and attribution of climate change: from global to regional.
- Brunini, O., Carvalho, J. P., Brunini, A. P. C., Padua-Junior, A. L., Adami, S. F., & Abramides, P. L. G. (2010). Agroclimatic zoning and climatic risks for sugarcane in Mexico: a preliminary study considering climate change scenarios. In *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol* (Vol. 27, pp. 302-314).
- 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(4), 287-291.
- Crutzen, P. J. (2006). The “anthropocene”. In *Earth system science in the anthropocene* (pp. 13-18). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Dai, A. (2021). Hydroclimatic trends during 1950–2018 over global land. *Climate Dynamics*, 56(11), 4027-4049.
- Donald, C. M., & Hamblin, J. (1983). The convergent evolution of annual seed crops in agriculture. In *Advances in agronomy* (Vol. 36, pp. 97-143). Academic Press.
- Durack, P. J., Wijffels, S. E., & Matear, R. J. (2012). Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000. *science*, 336(6080), 455-458.

- Estrada, F. Impacts and Economic Costs of Climate Change on the Mexican Agriculture. En revision.
- Feng, X., Porporato, A., & Rodriguez-Iturbe, I. (2013). Changes in rainfall seasonality in the tropics. *Nature Climate Change*, 3(9), 811-815.
- Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., ... & Zaehle, S. (2020). Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4), 3269-3340.
- Fuller, D. Q., Denham, T., Arroyo-Kalin, M., Lucas, L., Stevens, C. J., Qin, L., ... & Purugganan, M. D. (2014). Convergent evolution and parallelism in plant domestication revealed by an expanding archaeological record. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(17), 6147-6152.
- Gaffney, O., & Steffen, W. (2017). The anthropocene equation. *The Anthropocene Review*, 4(1), 53-61.
- 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.
- Gupta, A. K. (2004). Origin of agriculture and domestication of plants and animals linked to early Holocene climate amelioration. *Current science*, 54-59.
- Hansen, J. E., Sato, M., Lacis, A., Ruedy, R., Tegen, I., & Matthews, E. (1998). Climate forcings in the industrial era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(22), 12753-12758.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D. W., & Medina-Elizade, M. (2006). Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(39), 14288-14293.
- Hernandez-Ochoa, I. M., Asseng, S., Kassie, B. T., Xiong, W., Robertson, R., Pequeno, D. N. L., ... & Hoogenboom, G. (2018). Climate change impact on Mexico wheat production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 373-387.
- Heun, M., Schafer-Pregl, R., Klawan, D., Castagna, R., Accerbi, M., Borghi, B., & Salamini, F. (1997). Site of einkorn wheat domestication identified by DNA fingerprinting. *Science*, 278(5341), 1312-1314.

- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., & Schrag, D. P. (1998). A Neoproterozoic snowball earth. *science*, 281(5381), 1342-1346.
- IPCC, 2021: Summary for Policymakers. Allan, R. P., Hawkins, E., Bellouin, N., & Collins, B.
- Iizumi, T., Furuya, J., Shen, Z., Kim, W., Okada, M., Fujimori, S., ... & Nishimori, M. (2017). Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes. *Scientific Reports*, 7(1), 1-10.
- Iizumi, T., & Ramankutty, N. (2015). How do weather and climate influence cropping area and intensity?. *Global food security*, 4, 46-50.
- Iizumi, T., & Sakai, T. (2020). The global dataset of historical yields for major crops 1981–2016. *Scientific Data*, 7(1), 1-7.
- INEGI. 2019. Encuesta Nacional Agropecuaria. <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2019/>
- Kistler, L., Thakar, H. B., VanDerwarker, A. M., Domic, A., Bergström, A., George, R. J., ... & Kennett, D. J. (2020). Archaeological Central American maize genomes suggest ancient gene flow from South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(52), 33124-33129.
- Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C. H., Kossin, J., ... & Wu, L. (2020). Tropical cyclones and climate change assessment: Part II: Projected response to anthropogenic warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E303-E322.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C., ... & Zhu, D. (2018). Global carbon budget 2017. *Earth System Science Data*, 10(1), 405-448.
- Leff, B., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2004). Geographic distribution of major crops across the world. *Global biogeochemical cycles*, 18(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.
- Lesk, C., Rowhani, P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529(7584), 84-87.

- Li, C., Zhou, A., & Sang, T. (2006). Rice domestication by reducing shattering. *science*, 311(5769), 1936-1939.
- Mäkinen, H., Kaseva, J., Trnka, M., Balek, J., Kersebaum, K. C., Nendel, C., ... & Kahiluoto, H. (2018). Sensitivity of European wheat to extreme weather. *Field Crops Research*, 222, 209-217.
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M. M., Sanchez, J., Buckler, E., & Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(9), 6080-6084.
- Mishra, V., Tiwari, A. D., Aadhar, S., Shah, R., Xiao, M., Pai, D. S., & Lettenmaier, D. (2019). Drought and famine in India, 1870–2016. *Geophysical Research Letters*, 46(4), 2075-2083.
- 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.
- Müller, C., Franke, J., Jägermeyr, J., Ruane, A. C., Elliott, J., Moyer, E., ... & Zabel, F. (2021). Exploring uncertainties in global crop yield projections in a large ensemble of crop models and CMIP5 and CMIP6 climate scenarios. *Environmental Research Letters*, 16(3), 034040.
- Murray-Tortarolo, G. (2022). A breviary of Earth's climate changes using Stephan-Boltzmann law. *Atmósfera*. Early release.
- Murray-Tortarolo, G. N., & Jaramillo, V. J. (2020). Precipitation extremes in recent decades impact cattle populations at the global and national scales. *Science of The Total Environment*, 736, 139557.
- 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.
- Murray-Tortarolo, G. N. (2021). Seven decades of climate change across Mexico. *Atmósfera*, 34(2), 217-226.

- Naylor, R. L., Battisti, D. S., Vimont, D. J., Falcon, W. P., & Burke, M. B. (2007). Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(19), 7752-7757.
- Neukom, R., Barboza, L. A., Erb, M. P., Shi, F., Emile-Geay, J., Evans, M. N., ... & von Gunten, L. (2019). Consistent multi-decadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nature geoscience*, *12*(8), 643.
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *science*, *328*(5985), 1517-1520.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2020). Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change. *Agronomy*, *10*(8), 1120.
- Nunez, S., Arets, E., Alkemade, R., Verwer, C., & Leemans, R. (2019). Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2° C enough?. *Climatic Change*, *154*(3), 351-365.
- Pankhurst, R., & Johnson, D. H. (2019). The great drought and famine of 1888–92 in northeast Africa. In *The Ecology of Survival* (pp. 47-72). Routledge.
- Portmann, F. T., Siebert, S., & Döll, P. (2010). MIRCA2000—Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global biogeochemical cycles*, *24*(1).
- Poloczanska, E. (2020). The IPCC Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate—a view from the mountain tops to the deepest depths.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *nature*, *461*(7263), 472-475.
- Rocklöv, J., & Dubrow, R. (2020). Climate change: an enduring challenge for vector-borne disease prevention and control. *Nature immunology*, *21*(5), 479-483.
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., ... & 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.

- Rosenzweig, C., Mbow, C., Barioni, L. G., Benton, T. G., Herrero, M., Krishnapillai, M., ... & Portugal-Pereira, J. (2020). Climate change responses benefit from a global food system approach. *Nature Food*, 1(2), 94-97.
- Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global change biology*, 20(2), 408-417.
- Tebaldi, C., & Lobell, D. B. (2008). Towards probabilistic projections of climate change impacts on global crop yields. *Geophysical Research Letters*, 35(8).
- Teklu, T., Von Braun, J., & Zaki, E. (1992). Drought and famine relationships in Sudan: Policy implications. *Food and Nutrition Bulletin*, 14(2), 1-3.
- Tierney, J. E., Poulsen, C. J., Montañez, I. P., Bhattacharya, T., Feng, R., Ford, H. L., ... & Zhang, Y. G. (2020). Past climates inform our future. *Science*, 370(6517), eaay3701.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17-22.
- 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.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499.
- Voigt, A., Albern, N., Ceppi, P., Grise, K., Li, Y., & Medeiros, B. (2021). Clouds, radiation, and atmospheric circulation in the present-day climate and under climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 12(2), e694.
- Vogel, E., Donat, M. G., Alexander, L. V., Meinshausen, M., Ray, D. K., Karoly, D., ... & Frieler, K. (2019). The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environmental Research Letters*, 14(5), 054010.

- Waha, K., Van Bussel, L. G. J., Müller, C., & Bondeau, A. (2012). Climate-driven simulation of global crop sowing dates. *Global Ecology and Biogeography*, 21(2), 247-259.
- Wells, J. C., & Stock, J. T. (2020). Life history transitions at the origins of agriculture: a model for understanding how niche construction impacts human growth, demography and health. *Frontiers in Endocrinology*, 11, 325.
- Zachos, J. C., Wara, M. W., Bohaty, S., Delaney, M. L., Petrizzo, M. R., Brill, A., ... & Premoli-Silva, I. (2003). A transient rise in tropical sea surface temperature during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Science*, 302(5650), 1551-1554.
- Zhang, M., Abrahao, G., & Thompson, S. (2021). Sensitivity of soybean planting date to wet season onset in Mato Grosso, Brazil, and implications under climate change. *Climatic Change*, 168(3), 1-28.