

Forma correcta de citar:

Hernández Ayón J. M.; Chapa Balcorta C.; Bolaños González M. A.; López Serrano A.; e Ibarra Alonso P. (Editores). 2024. Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2024. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad del Mar (UMAR). Texcoco, Estado de México, México. ISSN 2954-4882. 254 p.

Programa Mexicano del Carbono
Calle Morelos No. 17
Colonia San Simón, C.P. 56210, Texcoco, Estado de México, México.

www.pmcarbono.org

Esta obra fue elaborada por el Programa Mexicano del Carbono (PMC).

Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio.

Diseño Gráfico: Oscar J. Velázquez R.

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DEL CICLO DEL CARBONO Y SUS INTERACCIONES EN MEXICO. Año 6, No. 6, enero - diciembre de 2024. Es una publicación anual editada por el Programa Mexicano del Carbono, A.C., calle Morelos No. 17, Colonia San Simón, C.P. 56210, Texcoco, Estado de México, México. Tel. +52 (595) 951•2182, www.pmcarbono.org Editor responsable: José Martín Hernández Ayón. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-121910292200-102, ISSN 2954-4882. Ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número: José Martín Hernández Ayón, Calle Morelos No. 17, Colonia San Simón, C.P. 56210, Texcoco, Estado de México, México, fecha de última modificación, diciembre de 2024.



8.4. Indicadores para la evaluación de una dieta sostenible

Pérez-Torres Lisouli^{1,2}; Yépez Enrico A.³; Lindig-Cisneros Roberto²; Moreno-Calles Ana I.⁴ y De la Barrera Erick^{2,*}

¹Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, México City 04510, MEXICO.

²Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán 58190, MEXICO.

³Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón, Sonora 85000, MEXICO.

⁴Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán 58190, MEXICO.

*Autor para correspondencia: delabarrera@unam.mx

Resumen

La intensificación de las prácticas agrícolas en respuesta a la creciente demanda de alimentos contribuye a la degradación ambiental. Los patrones alimentarios actuales agravan estos problemas, favoreciendo alimentos que son económicamente accesibles pero perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la salud. Este trabajo propone un marco teórico para la evaluación de la sostenibilidad alimentaria, denominado "huella alimentaria", que integra indicadores ambientales, sociales y económicos. En particular, se destaca el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero, que juegan un papel clave en la degradación ambiental vinculada a la producción de alimentos. El marco se aplicó a las dietas Occidental, Mediterránea, Atlántica y Mexicana, y se comparó con una dieta Planetaria saludable. Se calculó un índice sintético de la Huella Alimentaria para estas dietas, revelando que la dieta Occidental tiene el mayor impacto, lo que indica su insostenibilidad, mientras que la dieta Mexicana es la más sostenible. Este marco puede informar políticas y prácticas alimentarias sostenibles, para disminuir la huella alimentaria e impulsar la transición hacia dietas sostenibles, guiando tanto las decisiones individuales como las políticas gubernamentales hacia un sistema alimentario más resiliente y responsable.

Palabras clave: *Impacto ambiental; límites planetarios; dietas; seguridad alimentaria*

Abstract

The intensification of agricultural practices in response to the growing demand for food contributes to environmental degradation. Current dietary patterns exacerbate these issues, favoring foods that are economically accessible but harmful to both the environment and human health. This work proposes a framework for evaluating food sustainability, called the "foodprint," which integrates environmental, social, and economic indicators. In particular, the impact of greenhouse gas emissions is highlighted, as they play a key role in the environmental degradation associated with food production. The framework was applied to Western, Mediterranean, Atlantic, and Mexican diets, and compared with a healthy Planetary diet. A Synthetic Foodprint Index was calculated for these diets, revealing that the Western diet has the highest impact, indicating its unsustainability, while the Mexican diet is the most sustainable. This framework can inform sustainable food policies and practices to reduce the foodprint and promote the transition toward sustainable diets, guiding both individual decisions and government policies toward a more resilient and responsible food system.

Key words: *Environmental impact; planetary boundaries; diets; food security*

Introducción

El sistema alimentario global produce suficiente alimento para sostener a la población mundial, pero el crecimiento urbano impulsa la necesidad de aumentar la producción agrícola, la agricultura intensiva y a la industrialización de los alimentos que contribuyen a la degradación ambiental y al agotamiento de recursos (Johnston *et al.*, 2014; Alrøe *et al.*, 2016; Lombardi *et al.*, 2021).

Los sistemas alimentarios son responsables de entre el 21% y el 37% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático y poniendo en riesgo la seguridad alimentaria (IPCC, 2019; Piplani *et al.*, 2022). Además, los cambios en el uso de la tierra, impulsados por la expansión de los pastizales y el comercio global de alimentos, han provocado importantes impactos ambientales, como la deforestación y la pérdida de hábitat (Liu & Zhou, 2021; Alexander *et al.*, 2015). La agricultura y los sistemas alimentarios también han generado una creciente preocupación por la sobreexplotación de acuíferos, especialmente en países como México y China (Birney *et al.*, 2017; Dalin *et al.*, 2017). A su vez, el uso excesivo de fertilizantes ricos en nitrógeno y fósforo ha causado una degradación ambiental significativa, incluyendo la eutrofización y la pérdida de biodiversidad (Galloway *et al.*, 2017; Nesme *et al.*, 2018). Finalmente, la pérdida de biodiversidad y la propagación de especies invasoras afectan la integridad de la biósfera, disminuyendo la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios esenciales, lo que resulta clave para la sostenibilidad (Clapp *et al.*, 2022; Hampf *et al.*, 2020).

Los sistemas alimentarios globales no logran proporcionar una nutrición adecuada, lo que resulta en deficiencias nutricionales y enfermedades no transmisibles (EAT-Lancet Commission, 2019; He *et al.*, 2024). La comprensión de los hábitos alimentarios locales y la incorporación de alimentos regionales en los menús puede mejorar la percepción de los consumidores y promover la sostenibilidad (Wahlqvist & Lee, 2007; Cáceres-Rodríguez *et al.*, 2023).

El costo de la dieta influye en la sostenibilidad alimentaria, ya que afecta tanto la asequibilidad de una dieta nutritiva como los impactos ambientales y económicos a largo plazo (Andrieu *et al.*, 2006). En 2022, el 35% de la población global no pudo acceder a una dieta nutritiva, siendo el problema más grave en países de bajos ingresos (World Bank, 2024). Además, los costos externos asociados con elecciones dietéticas, como los gastos en salud relacionados con enfermedades no transmisibles como la obesidad, representan una carga económica significativa, estimada en dos millardos de dólares anuales globalmente (Sundin *et al.*, 2021; Walker *et al.*, 2010).

Dada esta complejidad, se necesita un enfoque integral para evaluar la sostenibilidad de las dietas, incorporando indicadores ambientales, sociales y económicos (van Dooren *et al.*, 2021). Este trabajo propone un marco teórico de la "huella alimentaria", que evalúa la sostenibilidad de las dietas basándose en estas tres dimensiones (Clapp *et al.*, 2022). La huella alimentaria se aplicó a diferentes dietas, demostrando cómo puede funcionar para evaluar la sostenibilidad de las dietas (Birney *et al.*, 2017; Piplani *et al.*, 2022).

Materiales y Métodos

La huella alimentaria está diseñada para evaluar la sostenibilidad de las dietas integrando diversos componentes a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida de los alimentos, divididas en siete etapas (Figura 1). Incorpora indicadores ambientales, sociales y económicos (Figura 1) para una evaluación integral. La huella alimentaria sugiere utilizar un conjunto más amplio de indicadores ambientales, incluidos los límites planetarios (Rockström *et al.*, 2009). Este enfoque evalúa si los sistemas alimentarios permanecen dentro de los límites operativos seguros para el cambio climático, la integridad de la biosfera, los flujos biogeoquímicos, el cambio en el uso del suelo y el cambio en el

agua dulce (Rockström *et al.*, 2009; Steffen *et al.*, 2015), lo cual es relevante, dado que estos límites están siendo excedidos actualmente (Richardson *et al.*, 2023).

Para las dimensiones social y económica, hay varios indicadores disponibles, incluyendo aquellos relacionados con la seguridad humana (Alkire, 2003), la justicia social (Raworth, 2012), los derechos humanos y las evaluaciones de políticas (de la Barrera *et al.*, 2019; Haro *et al.*, 2021). La huella alimentaria (Figura 1) utiliza indicadores como la ingesta calórica para la salud y la cultura alimentaria para la sostenibilidad social, y el costo de la dieta para la sostenibilidad económica, enfatizando la importancia de los recursos financieros en la adquisición de alimentos.

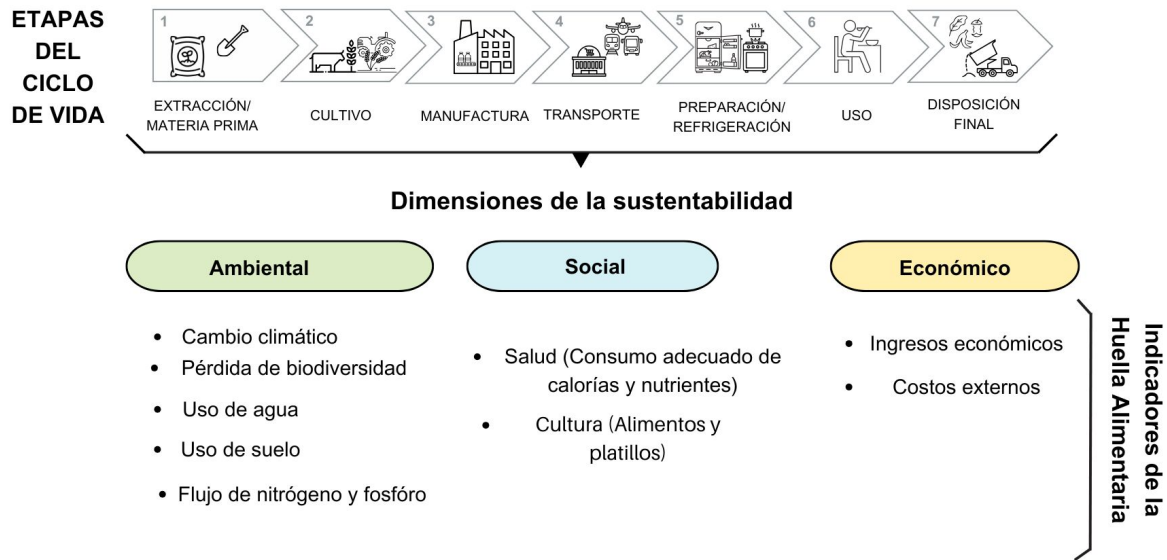


Figura 1. El marco de sustentabilidad de la huella alimentaria. Siete etapas en el ciclo de vida de un alimento o dieta en particular: 1) producción y adquisición de insumos, 2) cultivo de alimentos y cría de ganado, 3) procesamiento, 4) envasado y distribución, 5) preparación y almacenamiento (refrigeración), 6) uso (consumo), y 7) disposición final. (Birney *et al.*, 2017; Cambeses-Franco *et al.*, 2023; González-García *et al.*, 2021). Indicadores para cada dimensión de la sustentabilidad.

Resultados y Discusión

El análisis de la huella alimentaria muestra cuatro dietas ejemplificadas (occidental, mediterránea, atlántica, mexicana) comparadas con la dieta planetaria que sobrepasan a esta última en los indicadores ambientales. El indicador social (salud) se refleja en la cantidad diaria de energía consumida por persona, y el indicador económico se mide con el costo diario de los alimentos. Las dietas estudiadas superan el límite de $2 \text{ kg CO}_2\text{e} \cdot \text{persona}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ recomendado por la dieta planetaria, con la dieta occidental mostrando el mayor impacto. Los costos diarios oscilan entre USD 2.79 para la dieta mexicana y USD 9.58 para la dieta occidental (Chen *et al.*, 2019; Pais *et al.*, 2022).

Cuadro 1. Indicadores de la huella alimentaria de cinco dietas representativas. Los valores de cada indicador son adimensionales y se expresan en relación con la dieta planetaria. La Huella Alimentaria es un índice sintético de sostenibilidad de las dietas que se calcula con el promedio de los indicadores individuales.

Dieta	Ingesta de energía	Emisiones GEI	Agua	Uso de suelo	Costo	Huella alimentaria
Mediterránea	1	1.42	1.95	1.02	2.41	1.56
Atlántica	0.84	2.26	7.65	1.02	1.12	2.58
Mexicana	0.75	1.95	1.65	1.03	0.7	1.22
Global	1.18	3.5	13.42	1.07	1.43	4.12
Planetaria	1	1	1	1	1	1

El Índice Sintético para la Huella Alimentaria (SFI) compara los valores de cada dieta con los de la dieta planetaria. Aunque todas las dietas analizadas tienen un SFI mayor al de la dieta planetaria, indicando que no son sostenibles, la dieta mexicana resulta ser la más cercana a la planetaria, mientras que la dieta occidental muestra el mayor impacto debido a sus emisiones de gases de efecto invernadero y consumo de agua. La dieta mediterránea presenta un impacto socioecológico moderado, mientras que la dieta atlántica tiene un SFI más alto (Figura 2) (Papadopoulou & Mellios, 2023).

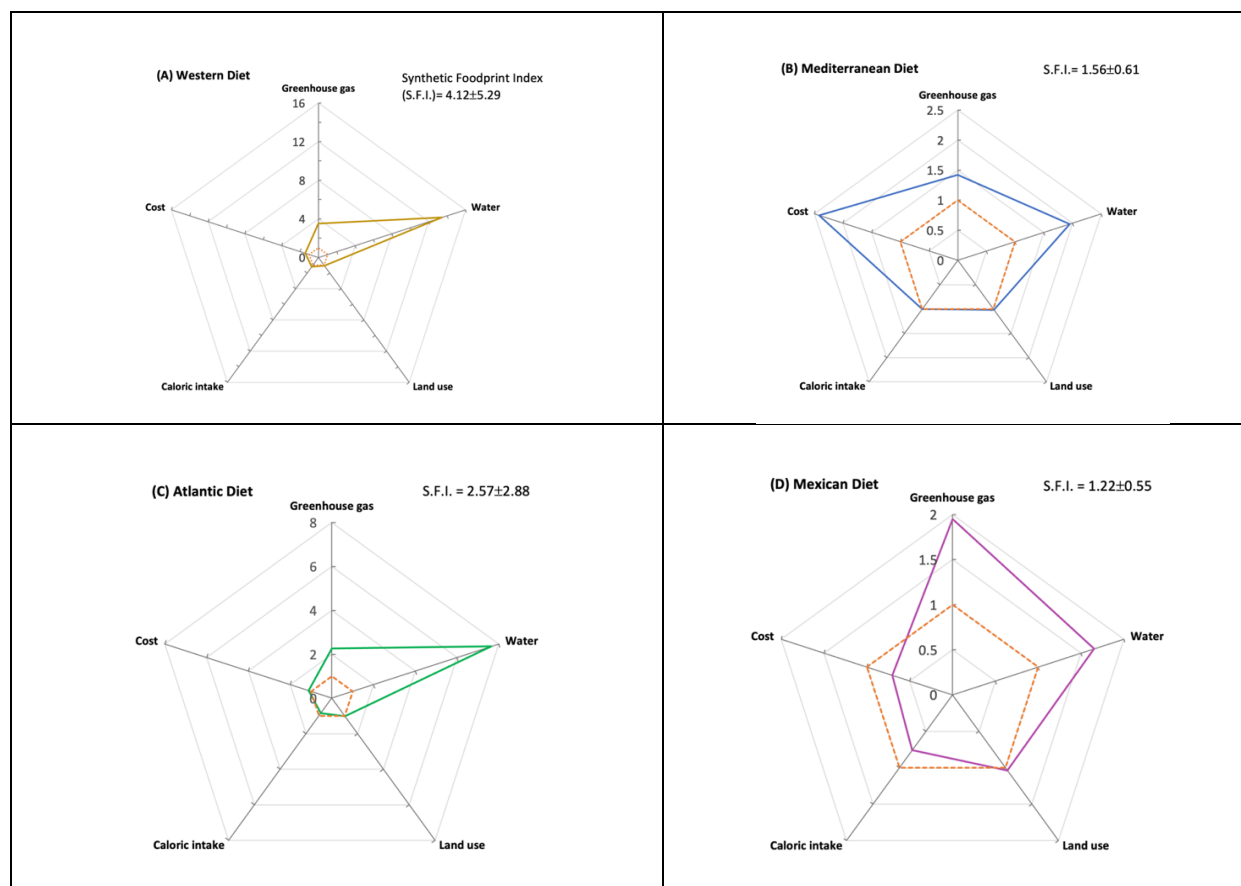


Figura 2. Huella alimentaria de dietas representativas. Los valores a lo largo de cada eje de factor (adimensionales) se expresan en relación con la dieta planetaria para las dietas (A) occidental, (B) mediterránea, (C) atlántica y (D) mexicana. El pentágono punteado naranja en todos los paneles indica los valores de referencia de la dieta planetaria.

Conclusiones

La huella alimentaria aplicada a cinco dietas muestra variaciones significativas, especialmente en los indicadores ambientales. Las dietas occidental y atlántica presentan un uso excesivo de agua, mientras que la dieta mediterránea es más costosa. Además, la dieta mexicana no alcanza la ingesta calórica recomendada. La adopción de una dieta basada en plantas puede ser una opción viable para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Pérez-Torres, 2022). La evaluación de la sostenibilidad a través de la huella alimentaria puede mejorar el diseño de políticas promoviendo una transición hacia dietas más sostenibles.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con fondos institucionales del Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México. LP-T recibió una generosa beca doctoral del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, México.

Literatura citada

- Alexander, P., Rounsevell, M. D. A., Dislich, C., Dodson, J. R., Engström, K., & Moran, D. (2015). Drivers for global agricultural land use change: The nexus of diet, population, yield and bioenergy. *Global Environmental Change*, 35, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.011>
- Alkire, S. (2003). *A Conceptual Framework for Human Security*. <https://doi.org/10.1080/13600818.2020.1854209>
- Alrøe, H. F., Møller, H., Læssøe, J., & Noe, E. (2016). Opportunities and challenges for multicriteria assessment of food system sustainability. In *Ecology and Society* (Vol. 21, Issue 1). Resilience Alliance. <https://doi.org/10.5751/ES-08394-210138>
- Andrieu, E., Darmon, N., & Drewnowski, A. (2006). Low-cost diets: More energy, fewer nutrients. *European Journal of Clinical Nutrition*, 60(3), 434–436. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602331>
- Birney, C. I., Franklin, K. F., Davidson, F. T., & Webber, M. E. (2017). An assessment of individual foodprints attributed to diets and food waste in the United States. *Environmental Research Letters*, 12(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8494>
- Cáceres-Rodríguez, P., Jara, M., Parra-Soto, S., Troncoso-Pantoja, C., & Lataste-Quintana, C. (2023). Culinary preparations, how to determine when they are part of a sustainable diet? In *Revista Chilena de Nutrición* (Vol. 50, Issue 1, pp. 86–97). Sociedad Chilena de Nutrición Bromatología y Toxicología. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182023000100086>
- Cambeses-Franco, C., González-García, S., Calvo-Malvar, M., Benítez-Estévez, A. J., Leis, R., Sánchez-Castro, J., Gude, F., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2023). A clustering approach to analyse the environmental and energetic impacts of Atlantic recipes - A Galician gastronomy case study. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135360. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135360>
- Chen, C., Chaudhary, A., & Mathys, A. (2019). Dietary change scenarios and implications for environmental, nutrition, human health and economic dimensions of food sustainability. *Nutrients*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/nu11040856>
- Clapp, J., Moseley, W. G., Burlingame, B., & Termine, P. (2022). Viewpoint: The case for a six-dimensional food security framework. In *Food Policy* (Vol. 106). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102164>
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., & Puma, M. J. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543(7647), 700–704. <https://doi.org/10.1038/nature21403>
- de la Barrera, E., Villalvazo-Figueroa, E. A., Díaz-Álvarez, E. A., Aguirre-Pérez, I. A., Alcázar-Aragón, A. A., Alvarado-Rodríguez, Á. A., Americano-Guerrero, D., Andrade-Campos, A., Arias-González, A., Arriaga-Suárez, R. A., Burciaga, R., Cabrera-Cuamba, K. A., Cancio-Coyac, B. A., Contreras-Guizar, C., Cristóbal-Reyes, S., Cruz, T. A., del-Río-Gómez, J. P., Díaz-Trasviña, C., Gaona-Villa, A., Villaseñor-Villanueva, A. (2019). 4T don't stand for tacos: An analysis of food and environmental security considerations in the new Mexican government's agricultural agenda. *F1000Research*, 8, 1768. <https://doi.org/10.12688/f1000research.20934.1>
- Galloway, J. N., Leach, A. M., Erisman, J. W., & Bleeker, A. (2017). Nitrogen: The historical progression from ignorance to knowledge, with a view to future solutions. *Soil Research*, 55(5–6), 417–424. <https://doi.org/10.1071/SR16334>
- González-García, S., Esteve-Llorens, X., González-García, R., González, L., Feijoo, G., Moreira, M. T., & Leis, R. (2021). Environmental assessment of menus for toddlers serviced at nursery canteen following the Atlantic diet recommendations. *Science of the Total Environment*, 770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145342>
- Hampf, A. C., Stella, T., Berg-Mohnicke, M., Kawohl, T., Kilian, M., & Nendel, C. (2020). Future yields of double-cropping systems in the Southern Amazon, Brazil, under climate change and technological development. *Agricultural Systems*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102707>
- Haro, A., Mendoza-Ponce, A., Calderón-Bustamante, Ó., Velasco, J. A., & Estrada, F. (2021). Evaluating Risk and Possible Adaptations to Climate Change Under a Socio-Ecological System Approach. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.674693>
- He, P., Liu, Z., Baiocchi, G., Guan, D., Bai, Y., & Hubacek, K. (2024). Health-environment efficiency of diets shows nonlinear trends over 1990–2011. *Nature Food*. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00924-z>

- Hendriks, S. L. (2018). Food policy and nutrition economics in the SDG era*. *Agrekon*, 57(3–4), 167–180. <https://doi.org/10.1080/03031853.2018.1479974>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In *Climate Change and Land*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>
- Johnston, J. L., Fanzo, J. C., & Cogill, B. (2014). Understanding sustainable diets: A descriptive analysis of the determinants and processes that influence diets and their impact on health, food security, and environmental sustainability. In *Advances in Nutrition* (Vol. 5, Issue 4, pp. 418–429). American Society for Nutrition. <https://doi.org/10.3945/an.113.005553>
- Liu, Y., & Zhou, Y. (2021). Reflections on China's food security and land use policy under rapid urbanization. *Land Use Policy*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105699>
- Lombardi, G. V., Parrini, S., Atzori, R., Stefani, G., Romano, D., Gastaldi, M., & Liu, G. (2021). Sustainable agriculture, food security and diet diversity. The case study of Tuscany, Italy. *Ecological Modelling*, 458. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109702>
- Nesme, T., Metson, G. S., & Bennett, E. M. (2018). Global phosphorus flows through agricultural trade. *Global Environmental Change*, 50, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.04.004>
- Pais, D. F., Marques, A. C., & Fuinhas, J. A. (2022). The cost of healthier and more sustainable food choices: Do plant-based consumers spend more on food? *Agricultural and Food Economics*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40100-022-00224-9>
- Papadopoulou, C.-A. and Mellios, N.: Integrating Water-Energy-Food-Ecosystems (WEFE) Nexus Indicators and SDGs , EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-6277, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-6277>, 2023.
- Pérez-Torres, L. (2022, May). Mitigación del cambio climático con dieta sustentable basada en vegetales. *Gaceta Universidad Abierta y a Distancia de México*, 24–28. <https://bit.ly/3X7xf6X>, 2023 (accessed 11 March 2023.)
- Piplani, P., Gulati, P., Malik, S., Goyal, S., Gurbaxani, M., & Bagler, G. (2022). FoodPrint: Computing Carbon Footprint of Recipes. *Proceedings - 2022 IEEE 38th International Conference on Data Engineering Workshops, ICDEW 2022*, 95–100. <https://doi.org/10.1109/ICDEW55742.2022.00020>
- Ranganathan, J., Vennard, D., Waite, R., Searchinger, T., Dumas, P., Lipinski, B. (2015). Toward a sustainable food future. *Research Papers in Economics*, 66-79.
- Raworth, K. (2012). *A Safe and Just Space for Humanity: Can we live within the doughnut?* www.oxfam.org/grow, 2024 (accessed 9 November 2023.)
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., Von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci. Adv.* 9, eadh2458(2023). DOI: [10.1126/sciadv.adh2458](https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458)
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009). <https://doi.org/10.1038/461472a/>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., De Vries, W., De Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Sundin, N., Rosell, M., Eriksson, M., Jensen, C., & Bianchi, M. (2021). The climate impact of excess food intake - An avoidable environmental burden. *Resources, Conservation and Recycling*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105777>
- van Dooren, N., Leseman, B., & van der Meulen, S. (2021). How new food networks change the urban environment: A case study in the contribution of sustainable, regional food systems to green and healthy cities. *Sustainability (Switzerland)*, 13(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su13020481>
- Wahlqvist ML, Lee MS. Regional food culture and development. *Asia Pac J Clin Nutr*. 2007;16 Suppl 1:2-7. PMID: 17392068.
- Walker, K. Z., O'Dea, K., Gomez, M., Girgis, S., & Colagiuri, R. (2010). Diet and exercise in the prevention of diabetes. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, 23(4), 344–352. <https://doi.org/10.1111/j.1365-277X.2010.01061.x>
- World Bank. (2024). *Food prices for nutrition*. International Comparison Program (ICP). <https://bit.ly/4g1UY1h>, 2024 (accessed 20 August 2024.)