

El sistema alimentario español en la transgresión de los límites planetarios

Eduardo Aguilera (CSIC); Juan Infante Amate (Universidad de Granada)

Introducción

La alimentación es una necesidad básica para la supervivencia humana, pero la producción de alimentos genera impactos ambientales que pueden amenazar su propia viabilidad. Hoy en día, la agricultura y la alimentación son la principal fuerza de transgresión en la mayoría de los denominados límites planetarios. En particular, contribuyen de forma destacada a problemas como la alteración de los ciclos hídricos, los flujos biogeoquímicos de nitrógeno y fósforo, la pérdida de biodiversidad o los cambios en el uso del suelo, y tienen un papel clave en las emisiones de gases de efecto invernadero. Campbell et al. (2017) mostraron por primera vez el papel fundamental de la producción agraria en la transgresión de estos límites seguros, lo cual ha sido ratificado por trabajos posteriores (Gerten et al., 2020; Rockström et al., 2020). El marco de los límites planetarios fue introducido originalmente por (Rockstrom et al., 2009), quienes identificaron nueve procesos biofísicos fundamentales cuyo límite de seguridad no debe sobrepasarse. En la actualidad, seis de los nueve límites planetarios (cambio climático, pérdida de biodiversidad, ciclos de nitrógeno y fósforo, ciclo del agua dulce, uso de la tierra y nuevas entidades) ya se habrían superado (Richardson et al., 2023; Steffen et al., 2015).

En España, la producción y el consumo alimentario han experimentado cambios profundos en las últimas décadas: ha crecido tanto la población como el suministro de alimentos por habitante, y ha cambiado el tipo de consumo (p. ej., mayor consumo de carne y productos de origen animal, aumento del desperdicio alimentario, etc.), así como la forma de producir los alimentos y su procedencia geográfica. Por ejemplo, el consumo de carne en España se ha disparado desde mediados del siglo XX, hasta situarse alrededor de 50 kg por persona al año en la actualidad. Este cambio dietético, acompañado de una mayor importación de pienso para alimentar a una cabaña creciente y cada vez más dominada por los monogástricos, ha incrementado la demanda de tierra y recursos agrícolas (como nitrógeno) más allá de las fronteras nacionales (González de Molina et al., 2017; Infante-Amate et al., 2018; Lassaletta et al., 2014). De hecho, España se ha convertido históricamente en un **importador neto de “tierra”** virtual a través del comercio de productos agrarios con un fuerte incremento en la segunda mitad del siglo XX. Asimismo, la disponibilidad calórica per cápita y el desperdicio alimentario han aumentado con el tiempo, reflejando un patrón de sobreconsumo que ejerce presión adicional sobre los recursos naturales. En síntesis, los cambios socioeconómicos y culturales de las últimas décadas (crecimiento demográfico, dieta más basada en productos ganaderos, globalización comercial, etc.) han intensificado los impactos ambientales del sistema alimentario español.

En este trabajo analizamos la evolución de los impactos ambientales del **sistema alimentario en España** y su contribución a la transgresión de los límites planetarios. Para ello, primero cuantificamos los principales impactos ecológicos asociados a la producción de alimentos dentro del territorio español en el último siglo, en relación con

los umbrales de seguridad propuestos. En segundo lugar, examinamos la **externalización de impactos** ambientales a otros territorios mediante el comercio internacional de alimentos y materias primas. Finalmente, exploramos escenarios futuros para el sistema agroalimentario español, considerando diferentes pautas de manejo agrario y de consumo, con el fin de evaluar en qué medida sería posible reducir estos impactos y volver a situarnos dentro de unos límites sostenibles.

2. Impactos ambientales en el territorio español y límites planetarios

En primer lugar, presentamos resultados sobre la evolución de varios **impactos ambientales generados por la producción de alimentos en España** durante más de un siglo (1900-2020), evaluados en el marco de los límites planetarios. En concreto, se consideran: los flujos de nitrógeno y fósforo en la agricultura, los cambios en la superficie forestal (deforestación/reforestación), las emisiones de GEI de origen agrario, el uso de agua para riego y la pérdida de biodiversidad asociada al agroecosistema. Para cada uno de estos procesos se proponen **umbrales de seguridad** adaptados al caso de España, que permitan estimar si se han transgredido límites críticos a escala nacional.

Ciclos biogeoquímicos (nitrógeno y fósforo)

La expansión del uso de fertilizantes sintéticos a partir de mediados del siglo XX contribuyó a incrementar la producción agraria pero también disparó sus pérdidas al medio y los impactos ambientales asociados (González de Molina et al., 2019; Lassaletta et al., 2014). El consumo de fertilizantes nitrogenados pasó de ser casi inexistente antes de 1950 a superar el **millón de toneladas anuales de N** en décadas recientes. Este enorme incremento ha llevado a un exceso de nutrientes en los suelos y aguas, provocando contaminación por nitratos, eutrofización de aguas continentales y costeras, y emisiones de óxido nitroso (N_2O), un potente gas de efecto invernadero (Aguilera et al., 2021).

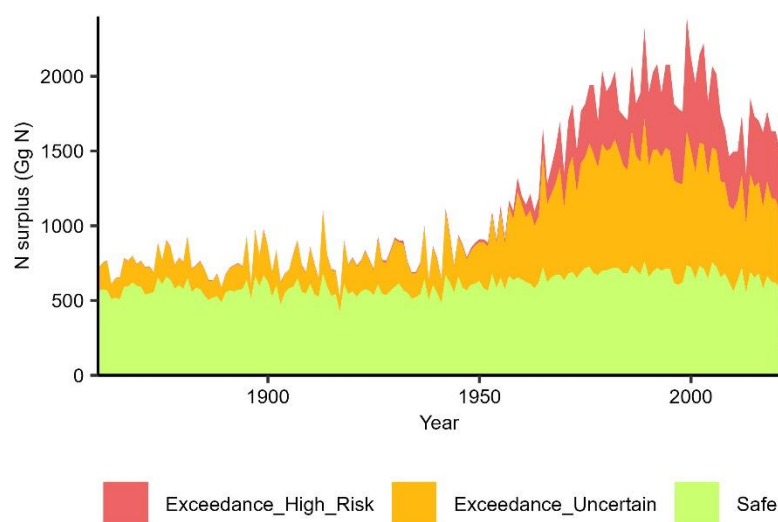


Figura 1. Pérdidas de nitrógeno al medio (N surplus) en la agricultura española, y su contribución a la transgresión del límite planetario del nitrógeno

En la figura 1 podemos observar cómo en el periodo anterior a 1950 solo una pequeña parte de las pérdidas al medio sobrepasaba los umbrales considerados seguros, mientras que con el crecimiento de las pérdidas la fracción por encima del umbral crítico se disparó, y hoy día representa más de la mitad de las pérdidas de N al medio debidas a la actividad agraria en España.

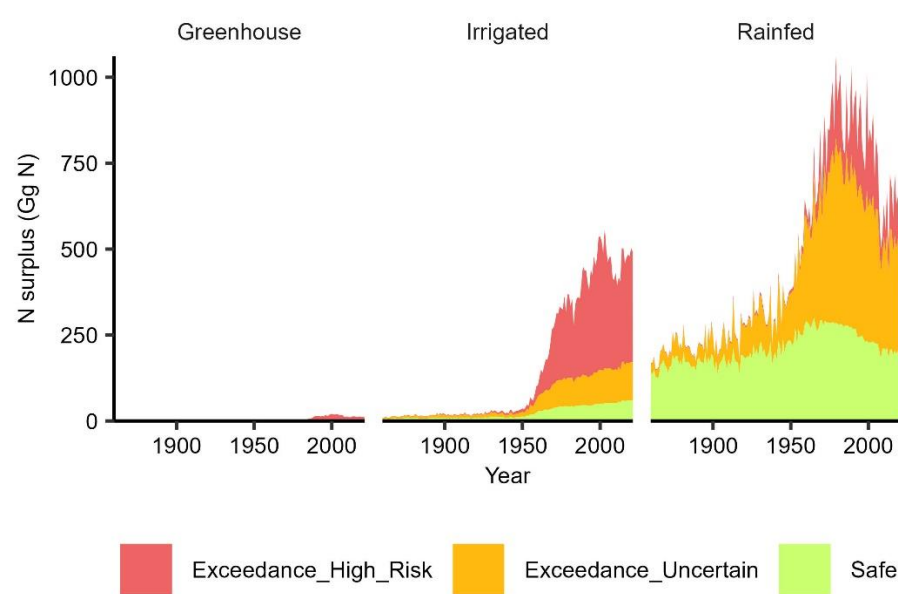


Figura 2. Pérdidas de nitrógeno al medio (N surplus) en las tierras cultivadas, en función del sistema de cultivo, y su contribución a la transgresión del límite planetario del nitrógeno

La figura 2 muestra cómo en los sistemas de regadíos, la mayor parte de las pérdidas sobrepasan los umbrales críticos, incluso el umbral de alto riesgo, mientras que en los secanos una gran parte de las pérdidas están bajo el umbral de seguridad.

En cuanto al fósforo, su uso masivo como fertilizante químico también ha provocado acumulación en suelos y riesgo de escorrentía hacia aguas, sobrepasando el umbral de seguridad en varias cuencas hidrográficas (especialmente en forma de eutrofización). En síntesis, los **flujos biogeoquímicos** de N y P originados por la agricultura española han **transgredido los límites seguros**, contribuyendo a la contaminación de aguas y atmósfera más allá de lo ambientalmente tolerable.

Uso de la tierra (deforestación y agricultura)

La conversión de ecosistemas naturales en tierras de cultivo es otro indicador crítico. En España, la superficie agrícola creció durante el siglo XX y la primera mitad del siglo XX a expensas de la cubierta forestal, alcanzando máximos a mediados de siglo. Por ejemplo, entre 1900 y 1970 se perdieron millones de hectáreas de bosques por la expansión agraria, leñera y ganadera ADDIN ZOTERO_ITEM CSL_CITATION

{"citationID":"weO4PHZj","properties":{"formattedCitation":"(MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), 2024)","plainCitation":"(MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico),

2024)";"noteIndex":0},"citationItems":[{"id":44159,"uris":["http://zotero.org/users/15086026/items/WVHFZKWL"],"itemData":{"id":44159,"type":"report","event-place":"Madrid","publisher":"Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico","publisher-place":"Madrid","title":"Informe inventario nacional de emisiones gases de efecto invernadero. Edición 2024 (1990-2022)","author":{"family":"MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico)","given":""},"issued":{"date-parts":[["2024"]]},"schema":"https://github.com/citation-style-language/schema/raw/master/csl-citation.json"} (MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), 2024). Sin embargo, en las últimas décadas la tendencia se invirtió: el abandono de tierras marginales y las políticas de repoblación forestal han permitido una cierta recuperación de los bosques (Infante-Amate et al., 2023, 2022). Esta transición forestal ha amortiguado el impacto nacional sobre el límite de “cambio en el uso del suelo”, ya que actualmente los bosques cubren aproximadamente el 37% del territorio español, en aumento, y la superficie agrícola se ha reducido al ~30

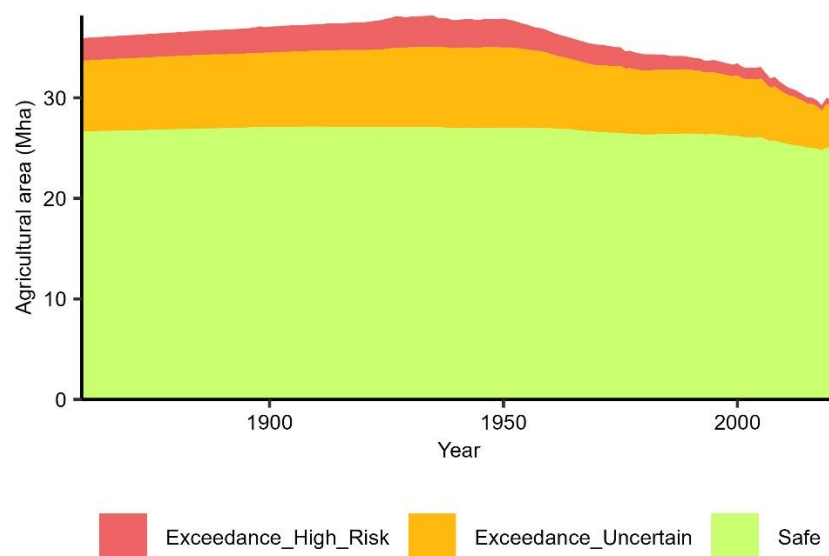


Figura 3. Superficie agraria española, y su contribución a la transgresión del límite planetario del uso de la tierra

Si consideramos el **límite planetario del uso de la tierra**, en la figura 3 mostramos cómo la reducción de la superficie agraria en España está generando un avance hacia el umbral de seguridad, si bien aún una parte de la superficie lo supera. En cualquier caso, cabe hacer varios matices a esta tendencia: por un lado, la intensificación agrícola en las zonas cultivadas supone un impacto cualitativo: monocultivos extensivos y eliminación de elementos seminaturales (setos, barbechos) reducen la funcionalidad ecológica del paisaje agrario más allá de lo indicado solo por la proporción de tierra cultivada. Por otro lado, como veremos en la sección 3, en la actualidad gran parte del uso de la tierra asociado a la producción y consumo de alimentos en España tiene lugar fuera de las fronteras españolas, y en concreto en zonas tropicales especialmente sensibles, y en las cuales el umbral de seguridad es mucho más bajo.

Cambio climático

El sistema alimentario español influye en el **cambio climático** tanto por emisiones directas de la producción agraria como por actividades asociadas (transporte, procesado, cambios de uso del suelo, etc.). Dentro del territorio español, las emisiones de GEI del sector agricultura (principalmente metano por la ganadería y óxido nitroso por fertilización) representan aproximadamente **el 12% del total de emisiones nacionales** (MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), 2024). Según esta fuente, en 2021, por ejemplo, el sector agrícola emitió unas 34 millones de toneladas de CO₂ equivalente, manteniéndose estable en los últimos años, y desde 1990, las emisiones agrarias españolas se redujeron levemente gracias a mejoras en eficacia y reducción del censo ganadero en algunos subsectores. Sin embargo, esta tendencia oculta tanto las emisiones indirectas como el crecimiento previo que había experimentado el sector.

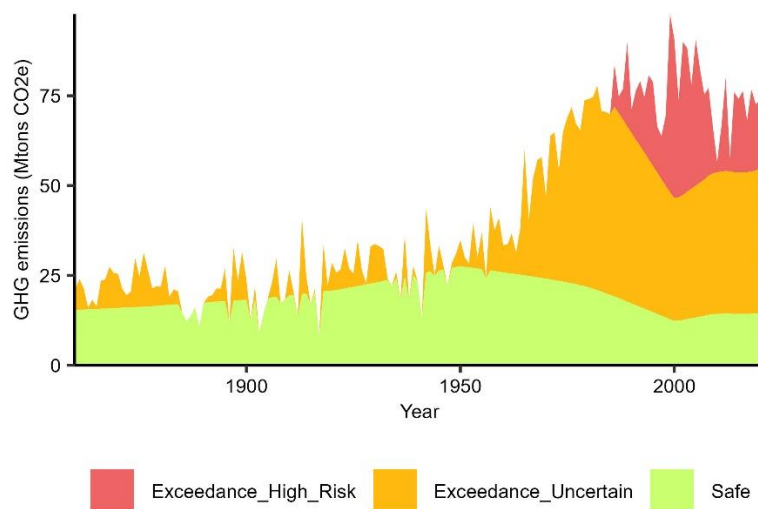


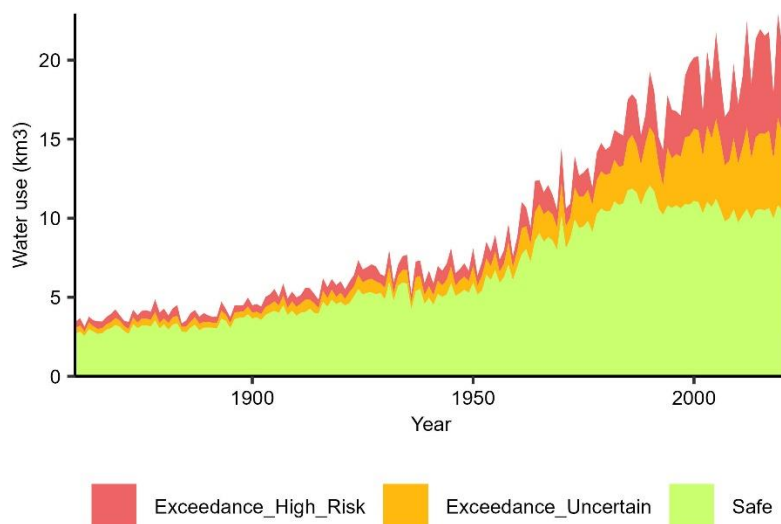
Figura 4. Emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura española, y su contribución a la transgresión del límite planetario del cambio climático

En términos de **límites planetarios**, el cambio climático ya está fuera del espacio operativo seguro (con concentraciones de CO₂ superiores a 420 ppm en 2025, frente al límite de ~350 ppm propuesto). Las emisiones acumuladas de España (un país desarrollado) han contribuido desproporcionadamente a esa transgresión. En la figura 4 mostramos cómo la industrialización agraria a partir de ca. 1960 supone la clara transgresión del límite planetario del cambio climático por parte de la agricultura.

Uso de agua dulce

España es un país con recursos hídricos limitados y marcadas irregularidades espaciales y temporales en las precipitaciones. La expansión del regadío durante el siglo XX multiplicó la extracción de agua para riego, permitiendo aumentos de productividad pero a costa de tensionar las reservas hídricas. El **agua utilizada por la agricultura** hoy supone entre el **70% y 80% del total de la extracción de agua** en el país, uno de los porcentajes más altos de la UE. Según estimaciones históricas, el **agua de riego consumida por el sector agrario español** se incrementó en más de un 150% entre 1860 y 2010 (Duarte et al., 2014), debido al crecimiento de la superficie regada (de apenas 0,8

millones de hectáreas en 1900 a alrededor de 3,6 millones en la actualidad) y al uso de técnicas intensivas en agua en zonas áridas. Este uso intensivo ha llevado al **estrés hídrico** en muchas cuencas: acuíferos sobreexplotados (por ejemplo, La Mancha occidental, Doñana), ríos con caudales ecológicos insuficientes (Guadalquivir, Segura) e incluso humedales desecados.



En términos del límite planetario de **uso de agua dulce**, que globalmente se refiere a no consumir más allá de la reposición sostenible de recursos hídricos, en España se ha pasado de una situación, en el periodo anterior a la mitad del siglo XX, en el que la gran mayoría del agua se utilizaba de manera sostenible, a la situación actual en la que más de un tercio del agua usada sobrepasa el límite planetario del agua dulce, una situación que presenta una elevada heterogeneidad espacial y que por tanto es mucho más grave en algunas cuencas. Además, el cambio climático agrava esta situación, reduciendo las disponibilidades futuras en hasta un 25% según proyecciones (IDDRI, 2020).

Valoración general

Considerados en conjunto, estos datos nos permiten evaluar **qué límites planetarios han sido transgredidos en España, cuándo ocurrió y cuál ha sido el papel de la producción agraria en dicha transgresión**. Los resultados señalan que varios de los umbrales de seguridad se sobrepasaron durante la segunda mitad del siglo XX. En la actualidad, España **opera fuera del espacio seguro ambiental** en lo referente a contaminación por nitrógeno y fósforo, cambio climático, y uso del agua. Solo en el caso del **uso de la tierra** ha habido cierta mejora relativa (reforestación neta), aunque compensada negativamente por la *externalización* de la huella territorial vía importaciones (como veremos en la siguiente sección). En definitiva, la producción agraria dentro de España ha tenido un **papel clave en la transgresión de límites planetarios**, y a pesar de algunos avances tecnológicos, seguimos afrontando una situación de insostenibilidad ambiental que exige transformaciones profundas.

3. Externalización de impactos y límites planetarios

Una parte sustancial de los impactos ambientales asociados al sistema alimentario español no ocurre dentro del territorio nacional, sino en otros países, debido a la integración en el **comercio internacional** de productos agroalimentarios. España importa grandes volúmenes de materias primas (piensos, soja, cereales, aceite de palma, pescado, etc.) y alimentos, cuyos procesos de producción en origen conllevan impactos ambientales que podríamos considerar “externalizados”. Del mismo modo, exportamos productos agrarios y sus impactos correspondientes, pero España ha sido tradicionalmente un **importador neto de recursos agroalimentarios en términos físicos** (Infante-Amate et al., 2018; Lassaletta et al., 2014). Por lo tanto, es crucial tener en cuenta estos flujos para evaluar la **huella ambiental real del consumo alimentario español**, que incluye tanto los impactos ocurridos dentro del país (analizados en la sección anterior) como aquellos ocurridos en los países proveedores.

En cuanto al **uso de suelo agrícola “embebido” en el comercio**, ya mencionamos que España es netamente dependiente de tierra foránea: desde comienzos del siglo XX nuestro país ha requerido más superficie de la que posee para sostener su consumo de biomasa. Infante-Amate et al. (2018) reconstruyeron esta tendencia histórica, mostrando que las importaciones netas de tierra cultivada pasaron de ~1 millón de hectáreas alrededor de 1900 a más de 6 millones de hectáreas en 2008. Este *déficit de tierra* se cubre principalmente mediante importación de piensos para ganadería (soja de Sudamérica, cereales), así como de otros productos cuya producción se expande en terceros países. La consecuencia es una **transferencia del impacto de uso de suelo**: la deforestación o conversión de ecosistemas para campos de soja en Brasil, Argentina o Paraguay está vinculada en parte a la demanda española (y europea) de proteína para alimentación animal. Igualmente, la expansión de plantaciones de aceite de palma en Indonesia o cacao en África Occidental responde al consumo de la UE, incluyendo España.

Un impacto particularmente preocupante es la **deforestación importada**. España, a través de sus importaciones de commodities agrícolas y ganaderas, contribuye indirectamente a la pérdida de bosques tropicales y otros ecosistemas valiosos en el mundo, y figura como uno de los países comunitarios con mayor huella de deforestación tropical a través de importaciones (especialmente por la compra de **soja para pienso** desde Brasil, Argentina y Paraguay, y de **aceite de palma** y otros alimentos exóticos)pure.iiasa.ac.at. Pendrill et al. (2019) estimaron que alrededor del **29% de las emisiones de CO₂ derivadas de la deforestación tropical** están relacionadas con productos agrícolas comercializados internacionalmente.

Asimismo, la **huella de carbono del consumo alimentario español** excede a las emisiones territoriales de nuestra agricultura, porque incluye las emisiones generadas en otros países para producir lo que importamos (Aguilera et al., 2020).

De igual forma, la **huella hídrica externa** es relevante: España importa productos con alto contenido de agua virtual (por ejemplo, pienso, algodón, fruta fuera de temporada), transfiriendo así su demanda de agua a regiones que a veces también sufren estrés hídrico. Un estudio calculó que el agua virtual neta importada por España a inicios del siglo XXI equivalía a decenas de miles de millones de m³ anuales (Duarte et al., 2014),

incluyendo agua “verde” de lluvia y “azul” de riego incorporada en los cultivos forrajeros y alimentos importados.

Al considerar los límites planetarios, esta externalización complica el panorama: muchos impactos que España ha “reducido” en su territorio (p. ej., la reforestación interna, la menor contaminación industrial doméstica) en realidad pueden haber sido **exportados** a otros lugares con regulaciones ambientales más laxas o ecosistemas más vulnerables. Por ejemplo, aunque dentro de España la deforestación ya no es significativa y los bosques se recuperan, la *huella de deforestación importada* significa que, como consumidores, seguimos contribuyendo a vulnerar el límite de pérdida de biodiversidad y cambio de uso del suelo a escala global (simplemente, la presión se ejerce sobre bosques de Amazonas o el Sudeste Asiático en lugar de sobre bosques ibéricos). De igual modo, si bien las aguas españolas están al límite, importamos productos de países donde también se están sobreexplotando ríos y acuíferos para regar cultivos destinados a la exportación (casos de frutas y hortalizas del norte de África, Perú o centro de Asia).

Es importante destacar que los impactos externalizados no se recogen en los inventarios ambientales nacionales convencionales. Por ello, para tener una visión completa de la **sostenibilidad del sistema alimentario español**, debemos sumar a los impactos domésticos los asociados al *consumo*, independientemente del lugar de producción. Si se hace este ejercicio, la conclusión es que la **huella ambiental total de la dieta española** es significativamente mayor que la huella territorial. En varios aspectos (tierra, agua, carbono, nutrientes), dependemos de excedentes o capacidades de carga de otros países, que a su vez pueden estar excediendo sus propios límites. Desde una perspectiva de justicia ambiental y de responsabilidad global, España –al igual que otros países europeos– está **trasladando parte de la carga ambiental** de su modelo de consumo alimentario a regiones tropicales y subtropicales, contribuyendo a la transgresión de límites planetarios a nivel internacional, aunque esos impactos no ocurran dentro de nuestras fronteras. Reducir esta externalización (por ejemplo, mediante la relocalización productiva, cambios dietéticos o acuerdos comerciales sostenibles) es un reto clave si se aspira a respetar los límites planetarios de forma integral y no solo nacional.

4. Mirada al futuro: escenarios hacia la sostenibilidad

Frente al diagnóstico actual de un sistema alimentario que transgrede varios límites planetarios, surge la pregunta de **cómo reorientarlo hacia la sostenibilidad**. En esta sección, exploramos escenarios futuros que contemplan cambios tanto en las prácticas agrarias como en los patrones de consumo, basándonos en información ya publicada por los autores y otros estudios prospectivos. Se sintetizan los resultados de escenarios contrastantes para el horizonte 2030-2050, desde uno tendencial (continuista) hasta otros más sostenibles, evaluando su impacto ambiental en términos de emisiones, uso de recursos y otros indicadores.

En cuanto a las **prácticas agrarias**, se consideran distintos modelos de producción: la agricultura convencional intensiva (predominante hoy), la agricultura ecológica (orgánica) certificada, y un modelo *agroecológico* transformador que incluiría prácticas como la

regeneración de suelos, la integración ganadero-agrícola, mayor diversidad de cultivos, etc. Por otro lado, en el ámbito del **consumo** se contemplan variaciones en la dieta (por ejemplo, converger hacia una *dieta mediterránea* saludable, con más vegetales y menos carne, versus la dieta actual hipercárnica) y en la reducción del desperdicio alimentario.

Los **escenarios explorados por los autores de este artículo** (publicados en diversos trabajos) indican que son posibles reducciones drásticas de los impactos si se llevan a cabo cambios sistémicos en producción y consumo. Por ejemplo (Aguilera and Rivera-Ferre, 2022) analizaron un escenario de transición agroecológica en España combinando un 100% de agricultura ecológica, relocalización de la producción y adopción generalizada de dieta mediterránea: los resultados mostraron reducciones de hasta el 70-80% en las emisiones de nitrógeno reactivo (N₂O, NH₃, nitratos) respecto al escenario tendencial, gracias a la menor fertilización química y al menor censo ganadero, y de más del 100% en el caso de las emisiones de gases de efecto invernadero. En contraste, un escenario intermedio alineado con la estrategia europea **Farm to Fork (De la Granja a la Mesa)** –que propone para 2030 un 25% de superficie ecológica, reducir 20% los fertilizantes y 50% los plaguicidas, reservar 10% de tierras para biodiversidad, pero sin cambio dietético significativo– lograría solo reducciones del 20-35% en las pérdidas de nitrógeno. Esto sugiere que las mejoras tecnológicas por sí solas, aunque necesarias, **no bastan** para volver a parámetros seguros si no van acompañadas de cambios profundos en el sistema alimentario.

Uno de los cambios con mayor potencial es el **cambio de dieta** de la población hacia pautas más sostenibles. La dieta mediterránea tradicional, rica en vegetales, legumbres y aceite de oliva, con moderada ingesta de pescado y baja en carnes rojas, es un modelo culturalmente apropiado para España y ambientalmente ventajoso. Un estudio de (Saez-Almendros et al., 2013) cuantificó que, si la población española retornase a un patrón alimentario mediterráneo óptimo, **las emisiones de GEI asociadas a la dieta se reducirían en un 72%**, el uso de suelo agrícola en un 58% y el consumo de energía en un 52%. Estas enormes reducciones se deben principalmente al menor consumo de carne y lácteos (productos con huella de carbono y tierra muy elevada) y al menor procesamiento industrial. Igualmente, la demanda de agua para alimentos bajaría ~33%. Es decir, **promover la dieta mediterránea** –u otras dietas basadas en más vegetales y menos productos de origen animal– aparece como una estrategia crucial para aliviar la presión del sistema alimentario sobre múltiples fronteras planetarias (clima, agua, biodiversidad), al mismo tiempo que mejora la salud pública.

Por el lado de la **producción agraria**, la evidencia apunta a que la agroecología y la agricultura ecológica pueden reducir significativamente ciertos impactos, aunque presentan retos de rendimiento y organización. La eliminación de pesticidas sintéticos y la reducción fuerte de fertilizantes químicos, como propone la agricultura ecológica, evitaría la contaminación difusa de aguas y la pérdida de biodiversidad por tóxicos, ayudando a volver a niveles seguros en esos indicadores. Sin embargo, sin cambios de dieta, un 100% ecológico podría requerir más superficie para producir la misma cantidad de alimento, lo que trasladaría presión a los ecosistemas (sea dentro o fuera del país). De ahí que la combinación de *producción sostenible + consumo sostenible* sea la clave de

los escenarios de triunfo. Un **escenario agroecológico integral** implicaría: prácticas de manejo regenerativas (rotaciones con leguminosas, policultivos, ganadería extensiva integrada), generalización de **agricultura ecológica** (sin insumos químicos de síntesis), restauración de elementos del paisaje (setos, bosques ribereños) para potenciar la biodiversidad funcional, y cadenas cortas de comercialización que reduzcan transporte y desperdicio. Si se lograra implantar, este modelo podría minimizar casi completamente las emisiones contaminantes de la agricultura (cero pesticidas, casi cero fertilización mineral = menos nitratos y N_2O), reducir un 40-60% las emisiones de GEI agrícolas (al renunciar a fertilizantes nitrogenados sintéticos, que son muy energéticos, y al mejorar los sumideros de carbono en suelo), y mejorar la resiliencia del agroecosistema ante sequías y plagas (dentro del límite planetario de estabilidad climática, se espera más volatilidad climática, y sistemas diversificados son más resilientes). Estudios europeos (como el **escenario TYFA** para una Europa agroecológica en 2050) concluyen que Europa podría alimentarse con producción 100% ecológica y dietas más sanas, reduciendo ~30% sus emisiones agrarias y deteniendo la pérdida de biodiversidad, a la vez que manteniendo la soberanía alimentaria. Por tanto, se requieren **cambios en la estructura productiva y de consumo simultáneamente**: con menos demanda de carne y más eficiencia alimentaria, las menores productividades se compensan y se evita necesidad de más tierras.

Otro elemento de un futuro sostenible es la **reducción del desperdicio alimentario**. Actualmente, se estima que en torno al 14% de los alimentos disponibles en España se desperdicia a lo largo de la cadena (MAPA, 2020), lo que implica un uso inútil de tierra, agua, fertilizantes y energía, y emisiones de GEI evitables. Los escenarios de sostenibilidad contemplan reducir a la mitad o más ese desperdicio para 2030-2050, lo que alivia proporcionalmente la presión ambiental (p. ej., menos superficie cultivada necesaria, menos volumen de agua extraído, etc.).

En resumen, las proyecciones hacia 2050 sugieren que **es posible reconducir el sistema alimentario español a un marco compatible con los límites planetarios**, siempre y cuando se implementen transformaciones ambiciosas tanto en la oferta (prácticas agroecológicas, eficiencia de recursos, economía circular en agricultura) como en la demanda (dieta mediterránea o basada en plantas, menor derroche, preferencia por producciones sostenibles).

En definitiva, **la sostenibilidad del sistema alimentario español en el siglo XXI dependerá críticamente de decisiones tomadas hoy**. Si se continúa con el modelo actual, se acentuará la insostenibilidad y la vulnerabilidad (agotamiento de acuíferos, colapso de polinizadores, aumento de emisiones). Por el contrario, una transición agroecológica y alimentaria podría restaurar equilibrios y respetar los límites planetarios, asegurando la viabilidad a largo plazo de nuestra seguridad alimentaria. Los próximos años serán decisivos para encaminarse hacia uno u otro futuro.

5. Conclusiones

El análisis realizado muestra que el sistema alimentario español, en su configuración actual, **contribuye de manera significativa a la transgresión de varios límites**

planetarios. La producción de alimentos dentro del país ha llevado a exceder umbrales de seguridad en ciclos de nutrientes (nitrógeno y fósforo), en el uso de agua dulce y en la integridad de la biosfera agraria, además de aportar al cambio climático global con un volumen importante de emisiones de GEI. Paralelamente, a través del comercio internacional, España externaliza parte de sus impactos, participando en la deforestación y la degradación ambiental de otros territorios para satisfacer su consumo. Esto implica que, aunque a escala local se observen algunas mejoras (como la recuperación forestal interna), nuestra **huella ecológica total excede con creces lo que sería nuestra “porción” equitativa de los límites planetarios.**

En otras palabras, si todos los habitantes del planeta tuvieran un sistema alimentario con los mismos patrones de consumo y producción que el español medio, la humanidad necesitaría múltiples Tierras para sostenerlo, rebasando peligrosamente la capacidad de regeneración de los ecosistemas globales. Este hecho subraya la **insostenibilidad** del modelo vigente y la necesidad imperiosa de transformarlo. Los límites planetarios ofrecen un marco conceptual para entender la magnitud del desafío: nos indican en qué dimensiones debemos frenar e invertir tendencias (por ejemplo, reducir drásticamente las pérdidas de nitrógeno o el consumo de agua), y cuánto tendríamos que disminuir nuestra presión para volver a una situación de seguridad.

Afortunadamente, existen alternativas y soluciones bien documentadas. Las **políticas y medidas** que podrían reconducir el sistema alimentario español dentro de los límites planetarios incluyen: (a) Fomentar dietas más sostenibles y saludables (menos carne y alimentos ultra-procesados, más vegetales frescos locales), mediante campañas de sensibilización, cambios en comedores colectivos, fiscalidad ambiental (p. ej., gravar alimentos con huella alta de carbono/nitrógeno); (b) Impulsar la **transición agroecológica** en las prácticas agrarias, apoyando a agricultores en conversión a ecológico, agroforestería, manejo integrado de nutrientes, etc., reorientando los incentivos de la PAC para premiar la provisión de servicios ecosistémicos y la reducción de insumos químicos; (c) Establecer regulaciones más estrictas en materia de uso de fertilizantes y pesticidas (por ejemplo, prohibir los más dañinos, limitar la fertilización a balances equilibrados) para aproximarnos a niveles seguros de nutrientes y toxicidad; (d) Proteger y restaurar hábitats asociados a la agricultura (setos, prados, humedales) creando **infraestructura verde** en el medio agrario y expandiendo las áreas de alto valor natural, lo cual ayudará a recuperar polinizadores, aves y controladores biológicos, acercándonos al límite de biodiversidad segura; (e) Mejorar la eficiencia en el uso del agua en regadíos (modernización con goteo donde sostenible, riego deficitario controlado) y, sobre todo, adecuar las superficies de regadío a la disponibilidad real bajo escenarios de cambio climático, evitando seguir expandiendo riegos en cuencas sobreexplotadas; (f) Reducir el desperdicio de alimentos a lo largo de la cadena, con campañas y mejoras logísticas, para aliviar la necesidad de producción extra y sus impactos asociados; y (g) Asegurar la **coherencia de las políticas comerciales y de cooperación** internacional de forma que España y la UE dejen de ser motores de deforestación o degradación en otros países (por ejemplo, implementando la reciente regulación de la UE que prohíbe la importación de productos asociados a deforestación, reforzando trazabilidad y acuerdos con países productores para mejorar la sostenibilidad).

Al adoptar estas medidas, no solo avanzaríamos hacia el respeto de los límites planetarios, sino que obtendríamos beneficios colaterales importantes: mejorar la salud de la población (dieta mediterránea y alimentos ecológicos), mayor resiliencia climática de la agricultura (suelos con más materia orgánica, paisajes más diversos resistiendo mejor sequías o plagas), soberanía alimentaria más robusta y disminución de la dependencia de insumos externos (fertilizantes, soja transgénica, combustibles fósiles), y en general un medio rural más vivo y sostenible. El **cumplimiento de los límites planetarios** no debe verse como una restricción asfixiante, sino como un espacio operativo seguro dentro del cual podemos desarrollarnos sin comprometer las bases biofísicas que nos sustentan. Volver a ese espacio seguro en el ámbito alimentario es factible con la ciencia y la tecnología actuales, pero requiere cambios en comportamientos, inversiones y prioridades políticas.

En conclusión, el sistema alimentario español se encuentra actualmente en **situación de exceso** respecto a varios parámetros ambientales críticos. Para garantizar su viabilidad a largo plazo y su equidad con el resto del planeta, deberá acometer transformaciones estructurales orientadas a la sostenibilidad. Un futuro en el que la producción agraria española funcione dentro de los límites de su entorno, manteniendo suelos fértiles, aguas limpias, clima estable y biodiversidad rica, es posible. Alcanzarlo implicará transitar hacia modelos agroecológicos y dietas saludables, reduciendo tanto la **huella interna** como la **huella externa** de nuestro alimento. Solo así lograremos que la alimentación –base de nuestra supervivencia– no socave las condiciones mismas que la hacen posible, respetando los **límites planetarios** y legando a las próximas generaciones un sistema alimentario verdaderamente sustentable.

6. Notas metodológicas

Sobre datos y fuentes: Los datos de actividad del sistema agroalimentario español en el largo plazo han sido recopilados principalmente a partir de fuentes oficiales (ej. Anuario de Estadística Agraria (MAPA, 2023), FAOSTAT (FAO, 2024)) y publicados en trabajos previos de los autores (Aguilera et al., 2021, 2019a, 2019b, 2018; González de Molina et al., 2019; Infante-Amate et al., 2023, 2018)

Sobre la estimación de los límites planetarios: Los umbrales críticos de seguridad específicos para España se estimaron principalmente a partir de las propuestas de la última evaluación global de los límites planetarios (Richardson et al., 2023). El desescalado al nivel nacional o provincial se ha hecho de manera distinta en función del sistema estudiado. En el caso del nitrógeno, se ha partido del umbral crítico de surplus por hectárea propuesto por (Schulte-Uebbing et al., 2022), tomando el promedio de Europa Occidental y el Norte de África, para dar cuenta de las condiciones más secas de España en relación a la media de Europa Occidental. En el caso del Cambio Climático, se ha dividido la cantidad total de emisiones que dan lugar a los límites de 350 y 450 ppm entre las personas-año que han habitado en el periodo 1850-2021. A su vez, se ha asumido que al sistema agroalimentario le corresponde la mitad de estas emisiones. En el caso del ciclo del agua, se ha tomado la propuesta de (Gerten et al., 2020) de un uso de

agua correspondiente al 40-70% del caudal natural del territorio, y se ha aplicado a nivel provincial. En el caso del uso de la tierra, se ha usado la propuesta de (Richardson et al., 2023) de un 50-80% de deforestación en zonas templadas, y también se ha aplicado a nivel provincial.

Limitaciones: Cabe señalar que existe incertidumbre en algunos datos históricos y en la downscaling de límites globales a escala nacional. Además, no todos los impactos ambientales se pueden cuantificar fácilmente con un solo indicador o umbral (v.g., la degradación de suelos, la dimensión cualitativa de la biodiversidad). Se ha optado por indicadores representativos y lo más compatibles posible con la literatura de límites planetarios, pero la interpretación de “transgresión” a escala país debe hacerse con precaución: los límites planetarios fueron concebidos para la Tierra en su conjunto y no hay un consenso científico absoluto sobre cómo aplicarlos regionalmente. Pese a ello, la metodología empleada proporciona **señales robustas** de insostenibilidad cuando los indicadores nacionales exceden ampliamente las referencias globales per cápita o por área.

En cuanto a la huella externa, un desafío metodológico es el seguimiento de cadenas de suministro globales complejas

Sobre escenarios: Las proyecciones a 2050 utilizadas no son predicciones, sino exploraciones “¿qué pasaría si...?” bajo ciertas hipótesis de políticas y comportamientos. Se basan en hipótesis plausibles (por ejemplo, sustitución de un porcentaje de carne por legumbres en la dieta, o rendimientos de agricultura ecológica cerrando brecha con la convencional gracias a mejoras agroecológicas). Sin embargo, están sujetas a numerosos condicionantes externos (desde la evolución tecnológica hasta las preferencias sociales o las alteraciones climáticas venideras). Por tanto, los resultados deben tomarse como **ilustrativos** del potencial de mitigación, no como cifras exactas garantizadas. La utilidad de estos escenarios radica en comparar direcciones de cambio: confirman que un camino de **estatus quo** conduce a seguir fuera de límites seguros, mientras que un camino de **cambio sistémico** permitiría regresar a ellos.

7. Bibliografía

- Aguilera, E., Guzmán, G.I., Alvaro-Fuentes, J., Infante-Amate, J., García-Ruiz, R., Carranza-Gallego, G., Soto, D., González De Molina, M., 2018. A historical perspective on soil organic carbon in Mediterranean cropland (Spain, 1900-2008). *Sci. Total Environ.* 621, 634–648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.243>
- Aguilera, E., Guzmán, G.I., González de Molina, M., Soto, D., Infante-Amate, J., 2019a. From animals to machines. The impact of mechanization on the carbon footprint of traction in Spanish agriculture: 1900–2014. *J. Clean Prod.* 221, 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.247>
- Aguilera, E., Piñero, P., Infante Amate, J., González de Molina, M., Lassaletta, L., Sanz-Cobeña, A., 2020. Emisiones de gases de efecto invernadero y huella de carbono de la alimentación en España. Real Academia de Ingeniería, Madrid.
- Aguilera, E., Rivera-Ferre, M.G., 2022. La urgencia de una transición agroecológica en España. Amigos de la Tierra, online.

- Aguilera, E., Sanz-Cobena, A., Infante-Amate, J., García-Ruiz, R., Vila-Traver, J., Guzmán, G.I., González de Molina, M., Rodríguez, A., Piñero, P., Lassaletta, L., 2021. Long-term trajectories of the C footprint of N fertilization in Mediterranean agriculture (Spain, 1860–2018). *Environmental Research Letters* 16, 085010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac17b7>
- Aguilera, E., Vila-Traver, J., Deemer, B.R., Infante-Amate, J., Guzmán, G.I., González de Molina, M., 2019b. Methane Emissions from Artificial Waterbodies Dominate the Carbon Footprint of Irrigation: A Study of Transitions in the Food–Energy–Water–Climate Nexus (Spain, 1900–2014). *Environ. Sci. Technol.* 53, 5091–5101. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00177>
- Duarte, R., Pinilla, V., Serrano, A., 2014. The water footprint of the Spanish agricultural sector: 1860–2010. *Ecol. Econ.* 108, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.10.020>
- FAO, 2024. FAOSTAT—FAO database for food and agriculture. Rome: Food and agriculture Organisation of United Nations (FAO). Available: <http://faostat3.fao.org/>.
- Gerten, D., Heck, V., Jägermeyr, J., Bodirsky, B.L., Fetzer, I., Jalava, M., Kummu, M., Lucht, W., Rockström, J., Schaphoff, S., Schellnhuber, H.J., 2020. Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sustainability*. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0465-1>
- González de Molina, M., David Soto, Juan Infante-Amate, Eduardo Aguilera, Jaime Vila, Gloria I. Guzmán, 2017. Decoupling food from land: the evolution of Spanish agriculture from 1960 to 2010. *Sustainability* 9, 2348. <https://doi.org/10.3390/su9122348>
- González de Molina, M., Soto Fernández, D., Guzmán, G.I., Infante-Amate, J., Aguilera, E., Traver, J., García-Ruiz, R., 2019. Historia de la agricultura española desde una perspectiva biofísica, 1900–2010. MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación), Madrid.
- Infante-Amate, J., Aguilera, E., Palmeri, F., Guzmán, G., Soto, D., García-Ruiz, R., de Molina, M.G., 2018. Land embodied in Spain's biomass trade and consumption (1900–2008): Historical changes, drivers and impacts. *Land Use Policy* 78, 493–502. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.019>
- Infante-Amate, J., Iriarte-Goñi, I., Aguilera, E., 2023. Historical changes in biomass carbon stocks in the Mediterranean (Spain, 1860–2010). *Anthropocene* 100416. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2023.100416>
- Infante-Amate, J., Iriarte-Goñi, I., Urrego, A., Gingrich, S., 2022. From woodfuel to industrial wood: A socio-metabolic reading of the forest transition in Spain (1860–2010). *Ecol. Econ.* 201, 107548. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107548>
- Lassaletta, L., Billen, G., Romero, E., Garnier, J., Aguilera, E., 2014. How changes in diet and trade patterns have shaped the N cycle at the national scale: Spain. *Regional Environmental Change* 14, 785–797. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0536-1>
- MAPA, 2023. Anuario de Estadística Agraria 1904–2021. MAPA (Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación), Madrid.
- MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico), 2024. Informe inventario nacional de emisiones gases de efecto invernadero. Edición 2024 (1990–2022). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.
- 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., Petri, S., Porkka, M., Rahmstorf, S., Schaphoff, S., Thonicke, K., Tobian, A., Virkki, V., Wang-Erlandsson, L., Weber, L., Rockström, J., 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci. Adv.* 9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>

- Rockström, J., Edenhofer, O., Gaertner, J., DeClerck, F., 2020. Planet-proofing the global food system. *Nature Food* 1, 3–5. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0010-4>
- Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sorlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Saez-Almendros, S., Obrador, B., Bach-Faig, A., Serra-Majem, L., 2013. Environmental footprints of Mediterranean versus Western dietary patterns: beyond the health benefits of the Mediterranean diet. *Environmental health : a global access science source* 12, 118. <https://doi.org/10.1186/1476-069x-12-118>
- Schulte-Uebbing, L.F., Beusen, A.H.W., Bouwman, A.F., de Vries, W., 2022. From planetary to regional boundaries for agricultural nitrogen pollution. *Nature* 610, 507–512. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05158-2>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, 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., Sorlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>