

Capacidad del sector obtentor para hacer frente a los retos del suministro alimentario



VALOR Y CAPACIDADES DEL SECTOR OBTENTOR

AGOSTO 2023

anove
Asociación Nacional
de Obtentores Vegetales

Institut  Cerdà

Índice del documento

1. Introducción.....	6
2. Retos de los sistemas agroalimentarios.....	8
2.1. Retos estructurales	9
2.2. Retos coyunturales: un mundo con crisis episódicas, continuadas y superpuestas... 53	
3. Herramientas para hacer frente a estos retos.....	62
3.1. La evolución de la mejora vegetal: de los orígenes de la agricultura a la actualidad . 66	
3.2. La mejora vegetal en la actualidad.....	69
3.3. Potencial de contribución de la mejora vegetal: ¿Cómo pueden ayudar las nuevas herramientas de edición genética en mejora vegetal a dar respuesta a los retos del suministro alimentario?	73
3.4. Conclusiones del potencial de la mejora vegetal y las nuevas técnicas de edición genómica.....	84
4. Limitaciones con las que se encuentra la mejora	85
4.1. Tecnología y legislación: avance a ritmos diferentes.....	85
4.2. Falta de recursos públicos para la evaluación de nuevas variedades.....	91
4.3. Falta de reconocimiento por parte de los consumidores y percepciones sesgadas... 91	
5. Principales conclusiones	93

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Impactos en prensa de los riesgos sobre la seguridad alimentaria derivados de la guerra de Ucrania.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Exposición a crisis externas de los sistemas alimentarios de los diferentes países del mundo</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3. Distribución de las causas de la demanda alimentaria.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4. Población mundial desde 1900 y proyección hasta 2100</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5. Proyecciones de población por Región para 2100 (escenario medio de Naciones Unidas)</i>	<i>12</i>
<i>Figura 6. Proyecciones de la población residente en España 2020-2070.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 7. Previsiones de crecimiento del PIB per cápita hasta 2050 por región</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8. Relación entre el gasto de alimentos en el hogar y el consumo de carne</i>	<i>16</i>
<i>Figura 9. Ingesta calórica per cápita según el grupo de alimentos, 1961-2050</i>	<i>16</i>
<i>Figura 10. Consumo de productos animales, situación el año 2012 y perspectivas para 2030 y 2050 en función de diferentes escenarios</i>	<i>17</i>
<i>Figura 11. Previsión de la evolución del número de cabezas de ganado a nivel mundial por regiones.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 12. Causas de la deforestación (año 2017)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 13. Cobertura de la superficie terrestre de la tierra entre el 3.000 a. C. y la actualidad .</i>	<i>18</i>
<i>Figura 14. Evolución de la superficie terrestre habitable desde el 10.000 a.C.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 15. Acuerdo de Glasgow para acabar con la deforestación en 2030.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 16. Principales anomalías y eventos climáticos durante el año 2022</i>	<i>22</i>
<i>Figura 17. Mapa del riesgo actual de sequía a nivel global</i>	<i>23</i>
<i>Figura 18. Variación del rendimiento previsto de la cebada en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010)</i>	<i>24</i>
<i>Figura 19. Variación del rendimiento previsto del maíz en grano en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010)</i>	<i>25</i>
<i>Figura 20. Variación del rendimiento previsto del trigo en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 21. Variación del rendimiento previsto del arroz en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 22. Variación del rendimiento previsto de a soja en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 23. Principales lugares de producción agrícola mundial de maíz, arroz, soja y trigo</i>	<i>27</i>
<i>Figura 24. Disminución prevista de la presencia de nutrientes en diferentes cultivos a CO₂ elevado (546-586 ppm) en relación con el CO₂ ambiental (aprox. 410 ppm).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 25. Cambios proyectados en la temperatura media anual (izquierda) y precipitaciones anuales (derecha).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 26. Olas de calor extremo en función del escenario climático considerado</i>	<i>30</i>
<i>Figura 27 Anomalía de la temperatura en España desde 1850. Período de referencia 1971-2000.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 28. Evolución del índice de aridez en función del incremento de temperaturas que se acabe produciendo</i>	<i>31</i>
<i>Figura 29. Potencial de impacto agregado del cambio climático en las diferentes regiones de la Unión Europea.....</i>	<i>33</i>

Figura 30. Cambios porcentuales medios del rendimiento de trigo en relación con el pasado reciente (1981-2010) para los escenarios de altas emisiones (RCP 8.5), con un calentamiento de 1,5°C en el periodo 2018-2029 (izquierda) y 2°C en 2030-2044 (derecha).....	34
Figura 31. Cambios porcentuales medios del rendimiento del maíz de regadío en relación con el pasado reciente (1981-2010) para los escenarios de altas emisiones (RCP 8.5), con un calentamiento de 1,5°C en el periodo 2018-2029 (izquierda) y 2°C en 2030-2044 (derecha)....	35
Figura 32. Resumen de los efectos potenciales del cambio climático en los cereales en España por tipo de riesgo	36
Figura 33. Consumo de fertilizantes, fitosanitarios (a) y suelo (b) entre 1990 y 2018 a nivel mundial y en la UE 28.....	37
Figura 34. Estrés hídrico en el sur de Europa	38
Figura 35. Evolución de la superficie irrigada y del consumo de agua por parte de la agricultura en España	38
Figura 36. Evolución del consumo de fertilizantes en la agricultura española (1961-2018).....	39
Figura 37. Evolución del consumo de fitosanitarios en la agricultura española 1996-2005.....	39
Figura 38. Evolución del consumo de fertilizantes en la agricultura española 2011-2021	40
Figura 39. Impactos ambientales de la producción de alimentos y la agricultura a escala global	41
Figura 40. Efectos ambientales de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad de la UE en 2030 respecto al escenario base (2014-2020)	43
Figura 41. Resumen de los principales impactos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad, bajo tres escenarios.	44
Figura 42. Cambios en la producción (% de variación) asociados a la consecución de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de biodiversidad (escenario en que estas políticas se aplicasen únicamente en la UE).	45
Figura 43. Variaciones en la superficie cultivada en la UE 27 (ha) o número de cabezas de ganado en 2030 respecto al escenario base 2014-2020, en caso de alcanzarse los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad.....	46
Figura 44. Balanza comercial neta de la UE para distintos productos vegetales en la situación actual y en el escenario 2030 en caso de alcanzarse los objetivos previstos en las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad de la UE.....	46
Figura 45. Cambios en la importación (arriba) y exportación (abajo) de alimentos en diferentes zonas del mundo en función de los tres escenarios de implantación de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad (únicamente en la UE, en la UE y otros países del mundo y a nivel global).	47
Figura 46. Cambios en la UE-27 de los precios para los productores para los principales cultivos y actividades ganaderas como consecuencia de la implantación de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad (año 2030 comparado con el periodo 2014-2020).....	48
Figura 47. Variación (%) de los ingresos de los agricultores como consecuencia de la implantación de las Estrategias Farm To Fork y de Biodiversidad	48
Figura 48. Cambios en el gasto en alimentación anual per cápita derivados de la implantación de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad (dólares adicionales de gasto).....	49
Figura 49. Incremento neto de la población en situación de inseguridad alimentaria derivado de los tres escenarios de implementación de las políticas de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad	50
Figura 50. Producción mundial de hortalizas por países en 2021	52
Figura 51. Producción mundial de tomate por países en 2021	52

<i>Figura 52. Valor (en miles de millones de dólares) de las exportaciones agrícolas a nivel global</i>	53
<i>Figura 53. Producción mundial de cereales por países en 2021 (trigo, arroz, maíz, cebada, avena, centeno, mijo, sorgo, alforfón y granos mezclados)</i>	54
<i>Figura 54. Precios pagados por los agricultores en 2021, 2022 y 2023.</i>	56
<i>Figura 55. Cuota de las exportaciones mundiales de cereales y aceites (2020)</i>	57
<i>Figura 56. 10 principales países exportadores de trigo a nivel mundial</i>	58
<i>Figura 57. 10 principales países exportadores de maíz a nivel mundial</i>	58
<i>Figura 58. 10 principales países exportadores de cebada a nivel mundial</i>	58
<i>Figura 59. 10 principales países exportadores de aceite de girasol a nivel mundial</i>	59
<i>Figura 60. Origen de las importaciones españolas de cereales y aceites (2020)</i>	59
<i>Figura 61. Principales exportadores mundiales de fertilizantes</i>	60
<i>Figura 62. Balance del mercado de fertilizantes en España</i>	60
<i>Figura 63. Repunte de los precios internacionales de alimentos y fertilizantes tras el inicio de la guerra de Ucrania</i>	61
<i>Figura 64. Exportación de grano desde Rusia 2008-2011 (millones de toneladas)</i>	61
<i>Figura 65. Necesidad de incremento del rendimiento de los cultivos en la UE entre 2020 y 2050 para hacer frente a los diferentes desafíos a los que se enfrenta la agricultura y comparativa con el incremento de rendimientos observados entre 1990 y 2020</i>	63
<i>Figura 66. Incremento de rendimientos en la UE aportados por la mejora vegetal y por las mejoras agronómicas entre 1990 y 2020. Máximo incremento de rendimiento que podrán aportar las mejoras agronómicas entre 2020 y 2050 y necesidad de incremento de rendimientos en este período que deberá ser aportado por la mejora vegetal</i>	64
<i>Figura 67. Ganancia potencial simulada para los cultivos principales herbáceos en la UE en 2040 mediante técnicas de breeding tradicionales</i>	65
<i>Figura 68. Orígenes de la domesticación de plantas de interés agrícola</i>	66
<i>Figura 69. Cambios en el fenotipo de las plantas debido a su domesticación y mejora</i>	67
<i>Figura 70. Variedad de trigo convencional (izquierda) y variedad de trigo semi-enana (derecha)</i>	68
<i>Figura 71. Evolución del número de aplicaciones recibidas para la protección comunitaria de variedades vegetales</i>	69
<i>Figura 75. Alimentos editados genéticamente (no transgénicos) con permiso para su comercialización (Julio 2023)*</i>	71
<i>Figura 72. Tiempo medio de producción de una nueva variedad vegetal con las características deseadas mediante diferentes técnicas de mejora vegetal</i>	74
<i>Figura 74. Marco regulatorio para la edición genética en plantas en 2022</i>	87
<i>Figura 76. Portada de noticia sobre el uso de CRISPR en el tratamiento de enfermedades.</i>	90

1. Introducción

Las recientes crisis han hecho emerger un reto que era inconcebible en el mundo globalizado de hoy: el riesgo de un horizonte de contracción/inseguridad en el suministro alimentario en España, las economías occidentales y los países en desarrollo.

Muchos de los retos a los que debe hacer frente el sistema alimentario no son nuevos, sino que se encontraban latentes, siendo aspectos que ya era necesario abordar: la necesidad de alimentar a una población mundial creciente, el progresivo encarecimiento de los insumos agrarios, fuertemente influenciados por el incremento de precios de la energía, la necesidad de transicionar hacia una agricultura con un menor impacto o la necesidad de adaptar los sistemas agrícolas al cambio climático.

A estos elementos se han sumado episodios de crisis continuadas que han puesto de manifiesto la debilidad del sistema alimentario mundial:

- La crisis de la COVID-19, de la que derivaron riesgos tanto para la producción agrícola, como para su distribución. Y de la que aún en día todavía se observan repercusiones asociadas a la estrangulación e incremento de precios de las cadenas logísticas a escala mundial.
- la guerra de Ucrania: Ucrania y Rusia son los principales productores de algunos de los productos alimentarios básicos para la dieta de buena parte de la población mundial, como el trigo, o el girasol, siendo Rusia uno de los principales productores de algunos de los principales insumos agrícolas, como los fertilizantes. A su vez, la configuración de Rusia como uno de los principales productores de combustibles a escala mundial, y el incremento de precios de la energía derivado de las sanciones a este país, también ha impactado sobre el precio de la producción y distribución agrícola y, consecuentemente, de los alimentos.

El suministro de alimentos a precios asequibles no se encuentra garantizado, siendo necesario abordar los retos a los que se enfrentan los sistemas alimentarios, tanto a escala global, como española.

Figura 1. Impactos en prensa de los riesgos sobre la seguridad alimentaria derivados de la guerra de Ucrania



Todos estos elementos han puesto fin a la falsa sensación de seguridad alimentaria, poniendo de manifiesto que el suministro de alimentos a precios asequibles no se encuentra garantizado y que resulta necesario abordar los retos a los que se enfrentan los sistemas alimentarios, tanto a escala global, como a escala española. De la adaptación a estos riesgos dependerá el suministro de alimentos en España a precios asequibles, así como de la situación de liderazgo de nuestro país en la producción de determinados productos agrícolas, como los hortícolas y de los beneficios económicos derivados de estos sectores.

En un contexto en que los sistemas alimentarios necesitarán producir más y mejor con menos recursos, la actividad del sector obtentor se configura como una herramienta clave.

En un contexto en que los sistemas alimentarios españoles necesitarán producir más y mejor, con menos recursos (fertilizantes, fitosanitarios, etc.), la actividad del sector de semillas y plantas se configura como una de las herramientas clave para garantizar la resiliencia del sector agroalimentario español y de toda la economía derivada del mismo. Asimismo, la actividad del sector será también necesaria para mejorar la cantidad y calidad de los nutrientes contenidos en los diferentes alimentos cultivados.

A lo largo del presente documento se detallan los retos a los que deben hacer frente los sistemas agroalimentarios mundial y español, el papel que el sector obtentor puede jugar para la superación de estos retos y las barreras existentes para su desarrollo.

Tal y cómo se refleja en las conclusiones, ***o se consigue que la actividad obtentora alcance todo su potencial, o no podrá garantizarse la seguridad alimentaria, lo que conllevará tener que hacer frente a un incremento de los gastos en alimentación, a posibles roturas en el suministro de determinados productos, especialmente para aquella población más desfavorecida, y al riesgo de desaparición de sectores económicos, que más allá de su aportación al PIB, han permitido fijar población en entornos rurales que, de lo contrario, habrían tenido y tendrán que hacer frente a dinámicas de abandono rural.***

2. Retos de los sistemas agroalimentarios

La seguridad alimentaria hace referencia a la disponibilidad física y económica de los hogares a alimentos suficientes, inocuos y nutritivos que cumplan con las necesidades dietéticas y preferencias alimentarias para vivir una vida activa y saludable¹.

Esta definición de la FAO, estrictamente focalizada en la accesibilidad de la población a los alimentos, se complementa con un elemento que cada vez más toma más relevancia, la resiliencia alimentaria. La resiliencia alimentaria, hace referencia a la capacidad del sistema alimentario de un territorio a hacer frente a las incertidumbres y riesgos externos a la hora de proporcionar alimentos a la población de forma sostenible económica y medioambientalmente.

En este contexto, la seguridad alimentaria (en el sentido de seguridad en el abastecimiento y capacidad de abastecer a la población) constituye uno de los principales retos a los que debe hacer frente la sociedad y, en particular, los gobiernos.

Muchos elementos de diferente índole están afectando de forma directa a la capacidad de alimentar a la población, tanto a nivel global, como a nivel local, como, por ejemplo, el incremento de la población mundial, los cambios alimentarios en los países emergentes (gracias al aumento del poder adquisitivo por cápita), la imposibilidad de incrementar la superficie agraria a escala mundial o el cambio climático.

Cabe destacar que, además, muchos de estos factores no son coyunturales, sino que forman parte de cambios estructurales a los que será necesario adaptarse. A título de ejemplo, el encarecimiento de las materias primas responde, de forma cualitativa, a causas coyunturales (guerra de Ucrania, especulación financiera, precio del petróleo, condicionantes políticos en países productores, etc.), pero también a causas estructurales (aumento de la población, aumento del consumo, cambio climático, etc.).

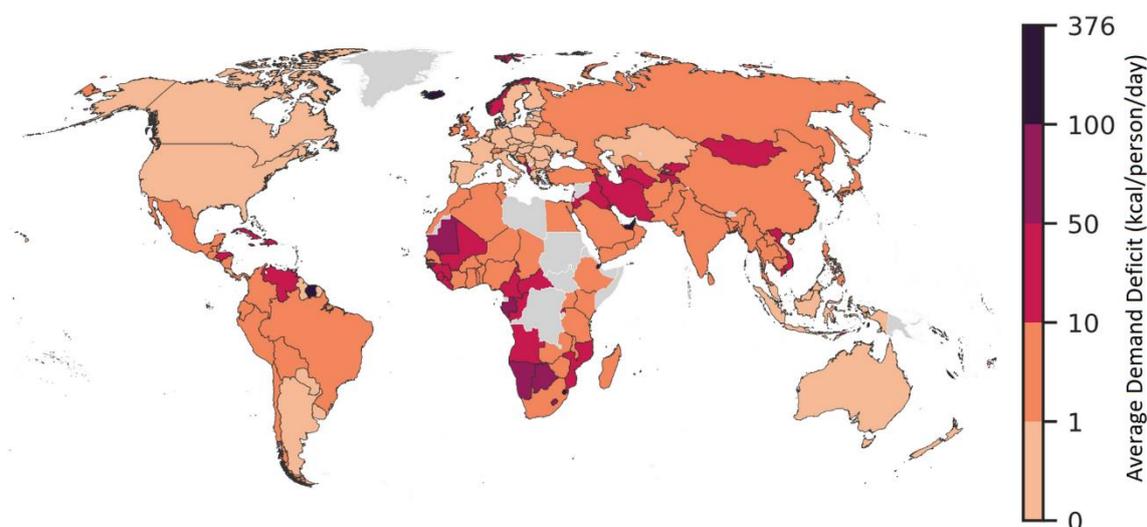
Todos estos elementos hacen aflorar, cada vez más la **necesidad de configurar soluciones que permitan abastecer a la población en escenarios futuros inciertos.**

*La seguridad alimentaria
constituye uno de los
principales retos a los que
debe hacer frente la
sociedad.*

*La resiliencia alimentaria
hace referencia a la
capacidad del sistema
alimentario de un territorio
para hacer frente a las
incertidumbres y riesgos
externos a la hora de
proporcionar alimentos a la
población de forma
sostenible económica y
ambientalmente.*

¹ FAO Agricultural and Development Economics Division (June 2006). Food Security. ftp://ftp.fao.org/es/ESA/policybriefs/pb_02.pdf. Retrieved June 8, 2012.

Figura 2. Exposición a crisis externas de los sistemas alimentarios de los diferentes países del mundo



Exposición a choques externos: déficit de demanda promedio. El mapa reporta el déficit de demanda final (en kcal/persona/día) promediado sobre una serie de N simulaciones que reproducen, una a la vez y para todos los países de la red, la propagación del shock asociado a una caída del 30% de la producción doméstica de alimentos.

Fuente: *Insights into countries' exposure and vulnerability to food trade shocks from network-based simulations*. Grassia, M., Mangioni, G., Schiavo, S., y Traverso, S. 2022.

Adicionalmente, cabe destacar que los retos y amenazas a los que se enfrenta el sistema alimentario están entrelazados e interrelacionados entre ellos de forma compleja. Existe un efecto multiplicador con relación a las diferentes amenazas. Así, por ejemplo, el aumento demográfico y económico implica un mayor consumo de alimentos, que generan un mayor consumo de fertilizantes, agua, energía, etc., aspectos que, a su vez, acaban derivando en un mayor impacto climático si no se enfocan correctamente.

2.1. Retos estructurales

A continuación, se presentan los principales retos de carácter estructural a que deben hacer frente los sistemas alimentarios mundial y español.

a. Alimentar a una población creciente

En los últimos años, la crisis del hambre ha alcanzado proporciones sin precedentes en todo el mundo. En 2021 se observaron niveles alarmantemente altos de hambre que superaron todos los récords anteriores. Casi 193 millones de personas en 53 países/territorios padecían inseguridad alimentaria aguda y necesitaban asistencia inmediata. Casi 40 millones más de personas padecieron hambre en comparación con el máximo anterior alcanzado en 2020. En solo 2 años, el número de personas con inseguridad severa se incrementó en más de 200 millones, de 135 millones en 53 países (antes de la pandemia de COVID-19) a 345 millones en 82 países. Además, se ha estimado que hasta 811 millones de personas se acuestan con hambre

cada noche². Asimismo, se estima que todavía unos 3.000 millones de personas en el mundo no pueden permitirse una dieta saludable.

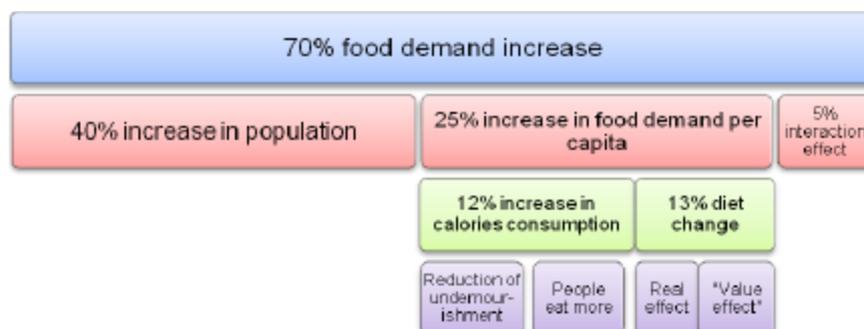
Si bien esta situación no se debe únicamente a la falta de producción de alimentos, sino también a una distribución inequitativa de los mismos y a la existencia de desperdicio alimentario, las cifras muestran que, si bien no existe esta problemática en países como España³, el hambre y la desnutrición son problemáticas que están lejos de solucionarse a escala mundial, y la propia evolución de la población, hacen prever que estos fenómenos vayan a más a no ser que se tomen medidas adicionales.

En este sentido, se espera que la población mundial llegue a 9.700 millones el 2050. Al incremento de la demanda de alimentos a nivel mundial resultante del incremento poblacional, se añade una presión adicional sobre la demanda de productos agrícolas, asociada a los cambios en la dieta de los países emergentes a medida que sus poblaciones incrementan su poder adquisitivo, aumentándose, tanto la ingesta calórica promedio, como la aportación de proteína animal a esta ingesta calórica. En este sentido, el incremento de la demanda de proteína animal supone una mayor presión sobre la demanda de productos agrarios, asociada a la demanda de alimentos para una cabaña animal creciente.

Se espera que la población mundial llegue a 9.700 millones en 2050.

En este sentido, la FAO estimó en 2009 que la producción de alimentos debía incrementarse en un 70% con vistas al año 2050 con objeto de hacer frente a estos retos⁴.

Figura 3. Distribución de las causas de la demanda alimentaria



Fuente: FAO, 2009

Las últimas estimaciones de la FAO indican que la producción de alimentos debería aumentar entre un 35% y un 50% para 2050.

Si bien en las últimas décadas se ha recorrido parte del camino, en buena medida gracias a la actividad del sector obtentor⁵, todavía queda mucho por hacer. En este sentido, las últimas estimaciones de la FAO indican que

² Informe sobre el Estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo. Naciones Unidas, 2022.

³ Cabe destacar que, si bien en España el hambre no es una problemática de gran magnitud, sí lo es, en los últimos años, el acceso a los alimentos a un precio asequible, habiéndose incrementado el porcentaje de ingresos que las familias vulnerables deben destinar a la cesta de la compra, aspecto que incide en la calidad y diversidad de la misma y en su capacidad para hacer frente a otros gastos.

⁴ Como alimentar al mundo en 2050. FAO, Fórum de Alto Nivel de Expertos, Roma, 12 y 13 de octubre de 2009.

⁵ Tan sólo en España, entre 1990 y 2018 la actividad del sector obtentor permitió incrementar la producción de trigo blando, maíz, tomate y arándanos entre 62 y 76 millones de toneladas. Fuente: Institut Cerdà, 2021.

la producción de alimentos debería aumentar entre un 35% y un 50% para el año 2050, respecto a los niveles existentes el año 2012⁶. (FAO, 2019).

Asimismo, cabe destacar que otras fuentes son menos optimistas que la FAO, estimando que el incremento debería ser de un 62% respecto a la producción existente en 2010⁷.

En este sentido, si bien resulta necesario incrementar la eficiencia y suficiencia de los sistemas alimentarios mediante la reducción del desperdicio alimentario y a través de cambios en el comportamiento y modificaciones estructurales de los sistemas de producción y las cadenas de suministro, la magnitud del reto existente hace que no se pueda hacer frente al mismo sin un incremento en las productividades de los diferentes cultivos.

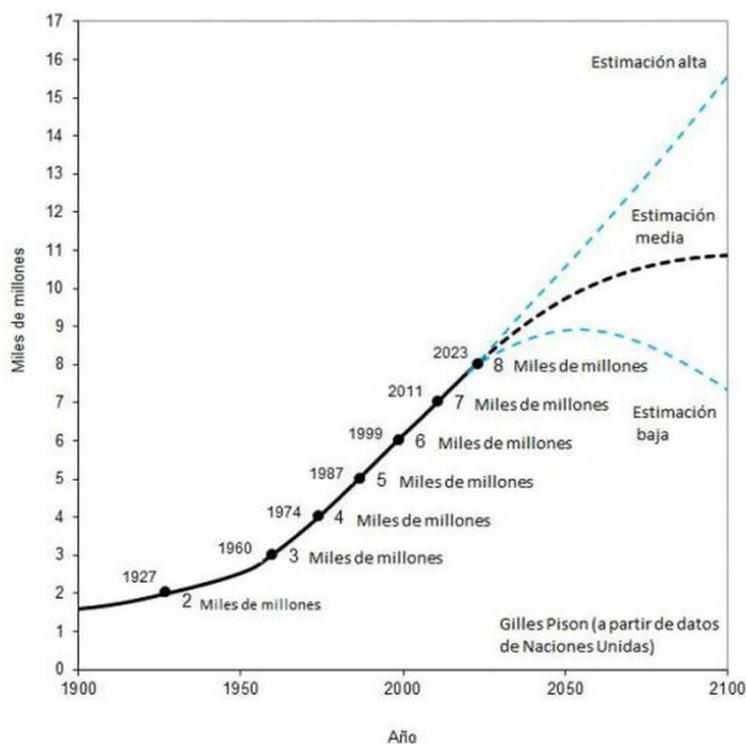
A continuación, se presentan de forma ampliada las previsiones de incremento poblacional y de cambios en la dieta, y las presiones que estos aspectos supondrán respecto a la producción de alimentos a nivel mundial.

Incremento de la población mundial

Se espera que la población mundial aumente en 2.000 millones de personas en los próximos 30 años, pasando de los 8.000 millones actuales a los 9.700 millones en 2050, pudiendo llegar a un pico de 10.400 millones para mediados de 2080⁸.

La magnitud del reto existente hace que no se pueda hacer frente al mismo sin un incremento de las productividades de los diferentes cultivos.

Figura 4. Población mundial desde 1900 y proyección hasta 2100



Fuente: Pison G., a partir de datos de base de Naciones Unidas. 2023

⁶ FAO, 2019.

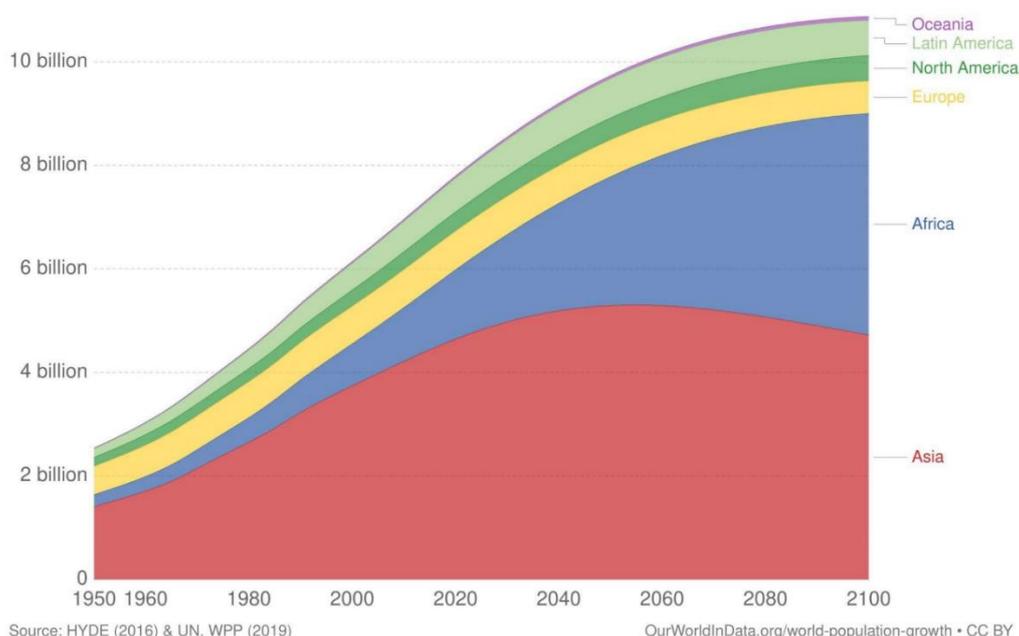
⁷ A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the periodo 2010-2050. Van Dijk, M. Morley, M. Rau, ML., Yashar, S., 2021.

⁸ Fuente: Naciones Unidas, 2023.

El incremento de la demanda a nivel mundial, a no ser que se incremente la producción de alimentos, supondría un incremento a escala global de precios, que también afectaría a España.

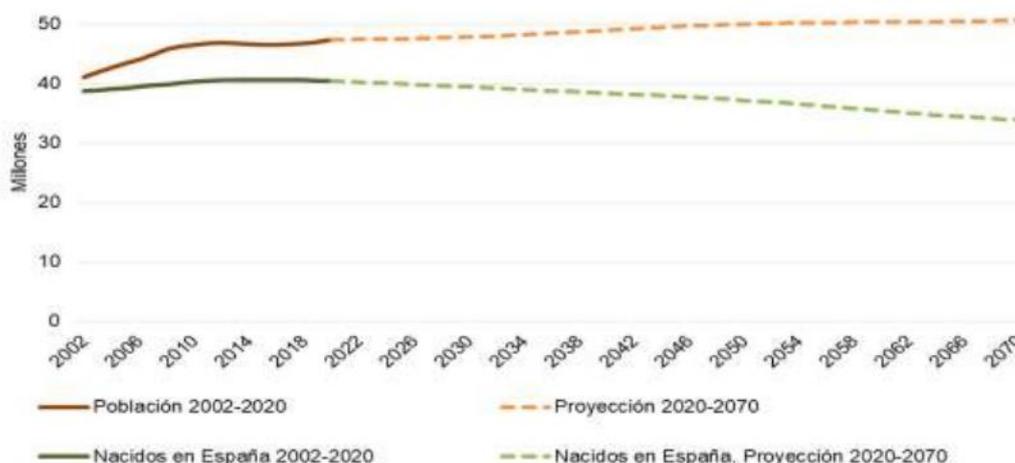
Si bien el incremento de población se producirá principalmente en Asia y África (en España las previsiones del Instituto Nacional de Estadística son de un incremento de 3 millones de personas para 2070), el incremento de la demanda a nivel mundial, a no ser que se produzca un aumento de la producción de alimentos, conllevaría a nivel global a un crecimiento de los precios de los alimentos que también afectaría a España, y, para determinados países, a un incremento de la población en situación de vulnerabilidad alimenticia o de hambruna.

Figura 5. Proyecciones de población por Región para 2100 (escenario medio de Naciones Unidas)



Fuente: Our World in Data a partir de datos de base de Naciones Unidas. 2016

Figura 6. Proyecciones de la población residente en España 2020-2070



Fuente: Instituto Nacional de Estadística, 2020.

En este contexto, en caso de no incrementarse la producción agrícola, se corre el riesgo que determinadas partes del mundo tengan que hacer frente en un futuro a una crisis de carácter malthusiano, que derive en elevadas cifras de mortalidad ante la incapacidad de que los agrosistemas den respuesta al incremento poblacional. No es la primera vez que las sociedades humanas se enfrentan a una situación de estas características, entre los siglos XVIII y XIX, principalmente en Europa, los avances en higienismo y medicina permitieron reducir los índices de mortandad de la población, lo que derivó en incrementos poblacionales que hubieran derivado en una situación de crisis que pudo evitarse gracias al desarrollo de la revolución agrícola. En este sentido, para hacer frente al actual crecimiento poblacional, el mundo deberá impulsar una nueva revolución agrícola que, necesariamente, deberá ser más acelerada que la primera revolución producida entre los siglos XVIII y XIX y que la revolución verde iniciada en los años 60 del siglo XX.

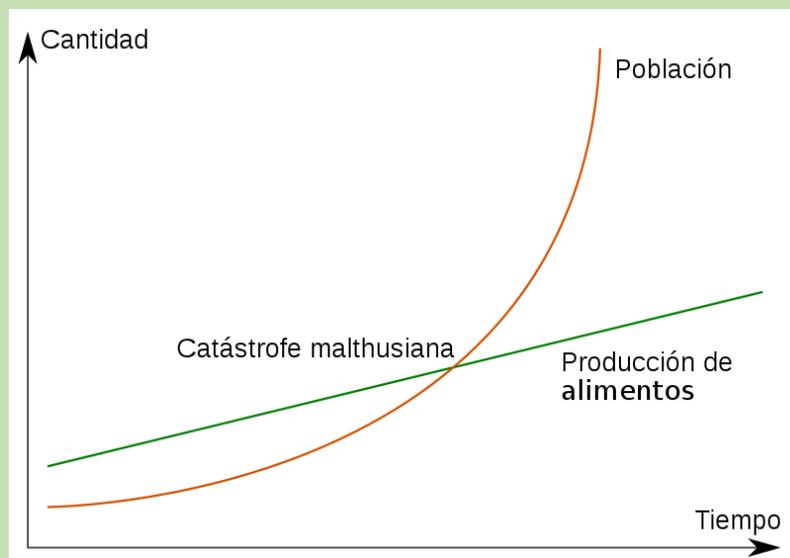
Para hacer frente al actual crecimiento poblacional, el mundo deberá impulsar una nueva revolución agrícola que, necesariamente, deberá ser más acelerada que la observada entre los siglos XVIII y XIX.

El concepto de crisis malthusiana

Thomas Malthus expuso su teoría sobre la crisis poblacional en su Ensayo sobre el principio de población (1798). Dicha hipótesis recogía, de manera muy sintetizada, y en base a las observaciones del autor, que la población mundial estaba creciendo de manera exponencial gracias a los avances en higiene y medicina, mientras que la producción agrícola se incrementaba de forma aritmética, haciendo inevitable que en algún momento el planeta no pudiese producir alimentos para todos sus habitantes, lo que derivaría en hambrunas, conflictos y un abrupto descenso poblacional.

El cumplimiento de la teoría malthusiana se observa en el análisis de poblaciones animales (ecología de poblaciones). Así, cuando una población animal supera la capacidad de carga del ecosistema donde habita, se produce un descenso poblacional por mortandad y/o por emigración de sus individuos.

*Tal y como se ha comentado, en el caso de la población humana, **los vaticinios de Malthus no llegaron a cumplirse, gracias al desarrollo de la revolución agraria**, que permitió incrementar la producción de alimentos también de forma exponencial.*



La primera revolución agraria (siglos XVIII-XIX)

La revolución agrícola describe un periodo de desarrollo agrícola en Europa (iniciándose en Gran Bretaña) que abarca desde el siglo XVII hasta mediados del siglo XIX, periodo durante el cual existió un incremento muy alto de la productividad agrícola, el rendimiento y de la producción total. Entre los principales factores que permitieron este proceso, se destacan los siguientes:

- El cercado de los campos de cultivo.
- Avances técnicos y mecanización.
 - Aparición de arados de hierro.
 - Uso de máquinas sembradoras.
 - Nuevas formas de drenaje.
- La rotación de cultivos.
- La mejora en la selección ganadera.
- **La selección de semillas** (profesionalización de la actividad de selección y aparición de las primeras empresas dedicadas a la mejora).
- Nuevas formas de organización económica de las explotaciones.
- Las mejoras en los métodos de fertilización con guano de las aves.

La revolución verde (iniciada en los años 60 del siglo XX)

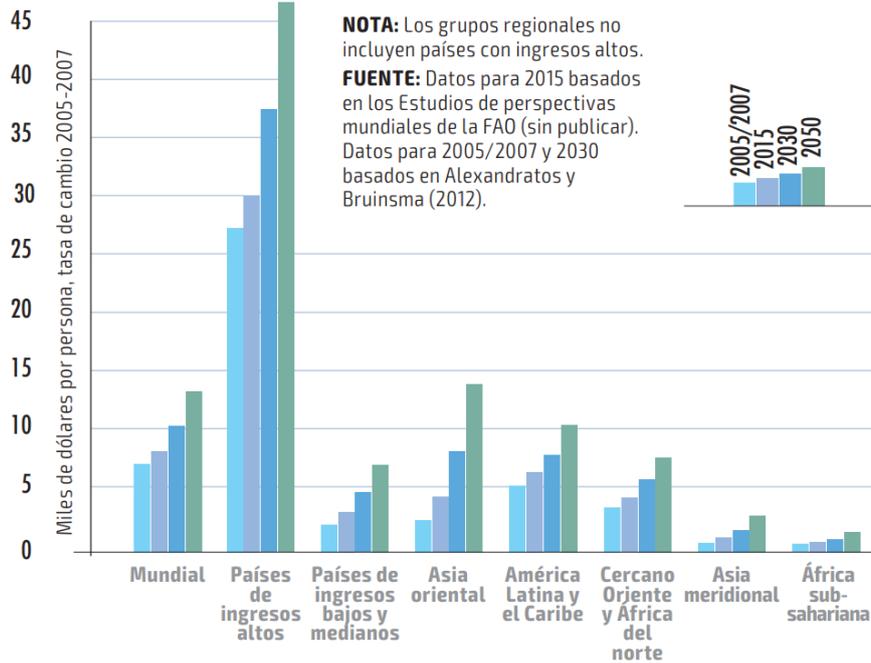
Revolución verde es la denominación usada para describir el importante incremento de la productividad agrícola y, por tanto, de alimentos, entre 1960 y 1980. Consistió en la adopción de una serie de prácticas y tecnologías, entre las que se incluyen la siembra de variedades de cereales (principalmente trigo, maíz y arroz) mejoradas (de más fácil mecanización, con una mayor producción de grano y más resistentes a climas extremos y plagas), nuevos métodos de cultivo (incluyendo una mayor mecanización), así como el uso de fertilizantes, fitosanitarios y riego por irrigación.

La revolución verde consiguió evitar la inanición de gran parte del mundo durante varias décadas. En este sentido, puede consultarse información adicional al respecto en el marco del capítulo 3.1.

Incremento del poder adquisitivo en los países emergentes y cambios en la dieta derivados

Las previsiones de desarrollo económico de los países emergentes, una buena en noticia en sí misma, dado el incremento asociado de oportunidades para sus poblaciones, constituye un factor adicional de presión sobre la demanda de alimentos

Figura 7. Previsiones de crecimiento del PIB per cápita hasta 2050 por región



Fuente: *El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos*. FAO, 2017.

El aumento de la renta per cápita permite una transición nutricional en los países emergentes basada en la sustitución de alimentos ricos en carbohidratos (cereales, raíces, tubérculos) por aceites vegetales, productos animales (carne y productos lácteos) y azúcar. En este sentido, se prevé (dependiendo de los escenarios) un incremento del consumo promedio de alimentos a nivel mundial de las 2.789 kcal/persona/día necesarias el año 2000, a un consumo en 2050 de entre 2.970 kcal/cápita/día y 3.580 kcal/cápita/día.

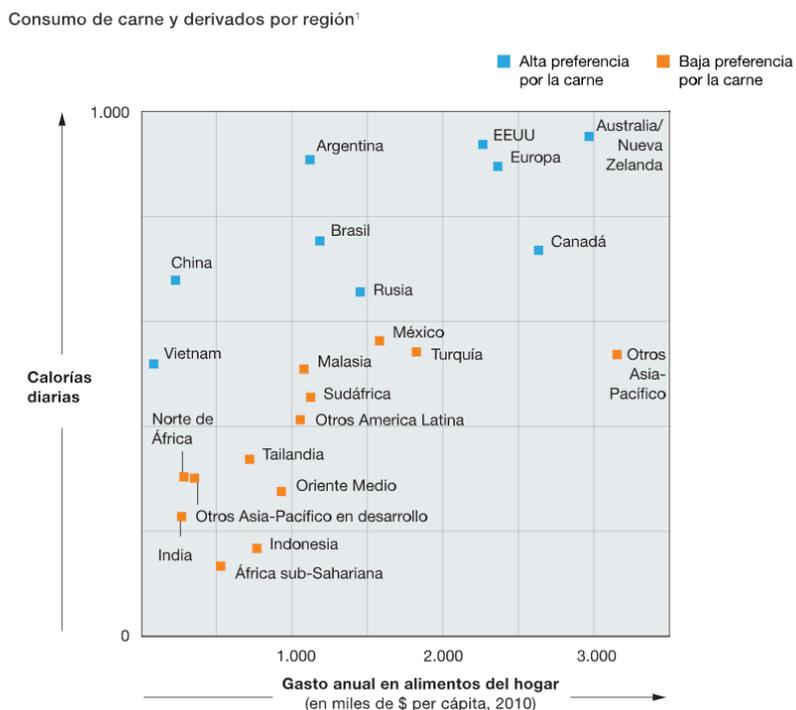
Asimismo, tal y como se ha comentado, el incremento de la necesidad de alimentos no se debe únicamente a una mayor ingesta, sino también a la variación en las fuentes de procedencia de las kilocalorías consumidas, pasando a ser mayor el peso en la aportación de la carne, grasas, azúcares y alimentos transformados, alimentos con un menor grado de eficiencia, dado que es necesario un mayor consumo de productos agrarios por kcal ingestada que en el caso de los productos vegetales.

En este sentido, históricamente, un mayor poder adquisitivo ha estado ligado a una mayor ingesta de proteínas, principalmente de origen animal, si bien la relación no es directamente proporcional.

El incremento de la necesidad de alimentos no se debe únicamente a una mayor ingesta, sino también a la variación de la procedencia de las kilocalorías consumidas.

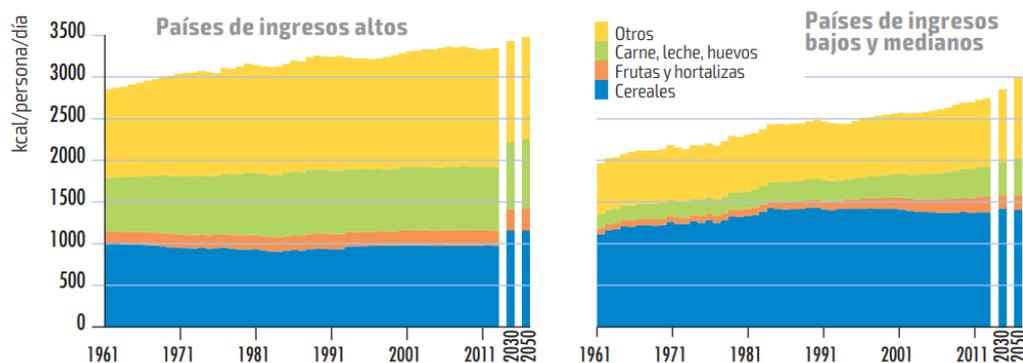
Históricamente, un mayor poder adquisitivo ha estado ligado a una mayor ingesta de proteínas.

Figura 8. Relación entre el gasto de alimentos en el hogar y el consumo de carne



Fuente: McKinsey, 2022

Figura 9. Ingesta calórica per cápita según el grupo de alimentos, 1961-2050



Fuente: El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos. FAO, 2017.

Si bien resulta necesario apostar por el cambio de dietas en las poblaciones, con objeto de reducir la ingesta de productos cárnicos, y existen diferentes iniciativas para encontrar alternativas a la carne (por ejemplo, carnes vegetales, carnes cultivadas, etc.), la aplicación de estas alternativas es todavía incipiente, por lo que se prevé un incremento de la demanda de proteína animal durante los próximos años.

Figura 10. Consumo de productos animales, situación el año 2012 y perspectivas para 2030 y 2050 en función de diferentes escenarios

REGIONS	kcal/person/day								index, 2012 = 100		
	1961	2012	2030			2050			2050		
	HISTORICAL	BASE YEAR	BAU	TSS	SSS	BAU	TSS	SSS	BAU	TSS	SSS
High-income countries	669	796	820	738	818	830	700	841	104	88	106
East Asia and Pacific	62	521	596	577	563	580	551	537	111	106	103
– China	46	632	733	697	688	723	665	669	115	105	106
– East Asia and Pacific (excluding China)	106	288	340	356	329	347	366	323	121	127	112
South Asia	122	238	274	280	266	276	278	260	116	117	109
Europe and Central Asia	402	622	656	646	643	649	630	624	104	101	100
Latin America and Caribbean	307	564	603	599	584	605	587	566	107	104	100
Near East and North Africa	157	287	321	316	317	321	313	305	112	109	106
Sub-Saharan Africa	124	175	207	227	199	230	231	192	131	132	109
Low- and middle-income countries	125	385	413	412	397	393	383	362	102	100	94
– Low- and middle-income countries (excluding China)	162	312	336	343	326	330	330	303	106	106	97
World	269	452	473	460	459	451	425	425	100	94	94

Note: Data for 1961 refer to per capita kilocalorie supply. Data for 2012 and thereafter refer to per capita kilocalorie consumption.
Sources: FAO Global Perspectives Studies, based on simulations with the FAO GAP5 model and FAOSTAT (various years).

Fuente: *El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos*. FAO, 2017.

En este sentido, para poder hacer frente a esta mayor demanda, se prevé un incremento de las cabezas ganaderas a nivel mundial y, por lo tanto, de las necesidades de alimentación asociadas a la producción animal, lo que se traduce en una presión añadida para incrementar la producción de alimentos a partir de los cultivos⁹.

Figura 11. Previsión de la evolución del número de cabezas de ganado a nivel mundial por regiones

Table 4.11 Total animal herd size

REGIONS	million livestock units							index, 2012 = 100		
	2012	2030			2050			2050		
	BASE YEAR	BAU	TSS	SSS	BAU	TSS	SSS	BAU	TSS	SSS
High-income countries	377	393	357	411	397	331	383	105	88	101
East Asia and Pacific	404	463	425	488	483	428	477	120	106	118
– China	302	336	306	356	330	286	325	109	95	108
– East Asia and Pacific (excluding China)	102	127	119	132	154	142	152	151	139	149
South Asia	263	317	292	300	321	293	319	122	111	121
Europe and Central Asia	83	107	97	115	122	108	120	148	131	145
Latin America and Caribbean	334	413	386	433	468	411	464	140	123	139
Near East and North Africa	59	70	65	71	84	75	80	142	127	136
Sub-Saharan Africa	226	397	372	421	582	556	552	258	247	245
Low- and middle-income countries	1 368	1 767	1 638	1 829	2 060	1 871	2 012	151	137	147
– Low- and middle-income countries (excluding China)	1 066	1 431	1 331	1 473	1 731	1 585	1 687	162	149	158
World	1 745	2 160	1 995	2 241	2 548	2 203	2 395	146	126	137

Note: Livestock units are calculated as in FAO, 2011b.

Source: FAO Global Perspectives Studies, based on simulations with the FAO GAP5 model and FAOSTAT (various years).

Fuente: *El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y desafíos*. FAO, 2017.

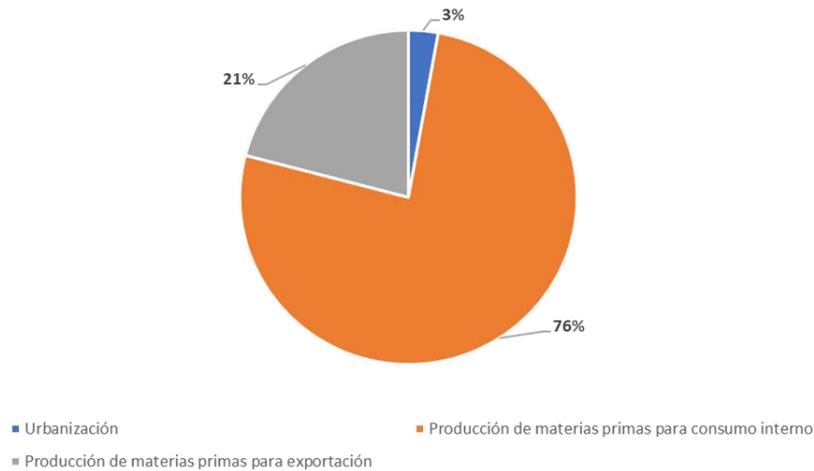
⁹ Al incrementarse el consumo de proteína animal, también se incrementarán las necesidades de proteína vegetal para alimentar al ganado. En este sentido, uno de los retos de la mejora vegetal es incrementar el rendimiento y la calidad de las proteínas vegetales obtenidas.

b. Imposibilidad de incrementar las tierras de cultivo

Históricamente, las actividades agrícolas (principalmente la actividad ganadera y, en menor medida la agricultura) han sido las principales causantes de la deforestación a nivel mundial. Así cuando se necesitaba una mayor producción de alimentos, esta necesidad acababa derivando en una sustitución de masas boscosas por pastos y cultivos.

Hoy en día, la producción de materias primas (principalmente ganaderas y agrícolas) sigue siendo la principal causa de la deforestación a escala mundial.

Figura 12. Causas de la deforestación (año 2017)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de base de Global Forest Watch. Pendrill et al, 2022: Deforestation risk embodied in production and consumption of agricultural and forestry commodities 2005-2018.

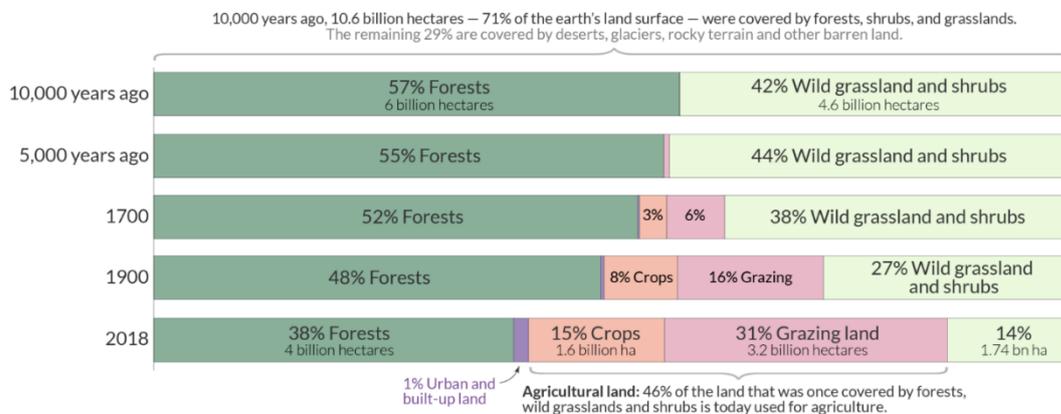
Figura 13. Cobertura de la superficie terrestre de la tierra entre el 3.000 a. C. y la actualidad





Fuente: Visualizing the World's Loss of Forest Since the Ice Age. Visual Capitalist, 2022.

Figura 14. Evolución de la superficie terrestre habitable desde el 10.000 a.C.



Fuente: OurWorldinData 2022, a partir de datos de la base de la FAO y Williams (Deforesting the earth, 2003).

La deforestación y la conversión de ecosistemas tiene un impacto negativo en los espacios naturales y la biodiversidad, afectando a la supervivencia de muchas especies, incluyendo a los polinizadores y a los depredadores naturales de las plagas agrícolas.

Asimismo, los bosques son a la vez sumideros y reservorios de carbono. Por este motivo, la gestión que se realice de las masas forestales tiene el potencial, tanto de agravar el cambio climático, tal y como ha ocurrido en el último siglo, como de mitigarlo. En el primer caso reduciendo la cobertura forestal y, por tanto, perdiendo reservas de carbono y la capacidad de seguir absorbiendo CO₂; y en el segundo propiciando el mantenimiento de los bosques existentes e incrementando su extensión. En la actualidad la deforestación a nivel mundial supone un 10% de las emisiones de gases de efecto invernadero¹⁰.

Dada la importancia de los bosques, desde una perspectiva climática, en la veintiseisava conferencia de las partes celebrada en noviembre de 2021 en Glasgow se alcanzó un acuerdo para detener la deforestación en 2030. Hasta el momento se han adherido al mismo 141 países (que suponen el 90% de la superficie forestal mundial).

Dada la importancia de los bosques, en la COP26 de Glasgow se alcanzó un acuerdo para detener la deforestación en 2030.

Figura 15. Acuerdo de Glasgow para acabar con la deforestación en 2030



En línea con el acuerdo alcanzado a nivel global, desde la Unión Europea se han comenzado a tomar medidas para acabar con la deforestación causada por la importación de materias primas agrícolas desde otros países, siendo la más destacada el Reglamento 2023/1115, relativo a la comercialización en el mercado de la Unión y a la exportación desde la Unión de determinadas materias primas y productos asociados a la deforestación y la degradación forestal.

Dados los impactos asociados a la deforestación, a los compromisos adquiridos para acabar con la misma a nivel mundial y atendiendo a que los pastos y campos de cultivo ya suponen un 50% de la superficie terrestre, la respuesta a las necesidades crecientes de alimentos no podrá desarrollarse, a diferencia de lo ocurrido en épocas anteriores, mediante la ampliación de las tierras agrícolas. Para hacer frente a un aumento de la demanda en un contexto de limitación del suelo agrario disponible para uso alimentario, es necesario continuar¹¹ y acelerar el desarrollo de mecanismos, herramientas e innovaciones que permitan un incremento del rendimiento, en lugar de la expansión de la superficie cultivada.

¹⁰ Naciones Unidas, 2018.

¹¹ A nivel mundial, el 79% del aumento de la producción de cultivos entre 1961 y 1999 se debió al aumento de rendimientos y el 22% a la expansión de la superficie cultivada. Bruinsma, J. (2009). *The Resource Outlook to 2050*

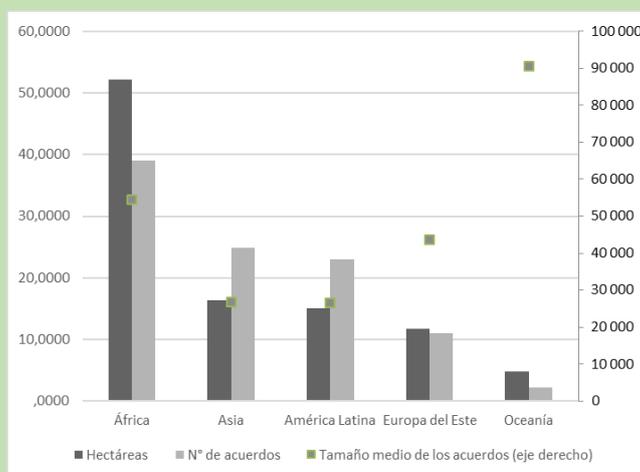
En este sentido, la concepción de las tierras de cultivo como un recurso limitado y de gran valor a futuro, se detecta en el incremento de las compras de tierras por parte de fondos de inversión empresas o estados fuera de sus fronteras de origen, un concepto al que se comienza a denominar land grabbing o acaparamiento de tierras.

Dado los impactos asociados a la deforestación, a los compromisos adquiridos para acabar con la misma a nivel mundial y atendiendo a que los pastos y campos de cultivo ya suponen un 50% de la superficie terrestre, la respuesta a las necesidades crecientes de alimentos no podrá desarrollarse mediante la ampliación de las tierras agrícolas.

El fenómeno del acaparamiento de tierras

El fenómeno del acaparamiento de tierras comienza en la década del 2000 de la mano de las principales corporaciones agroalimentarias estadounidenses, algunos fondos europeos y la expansión de las empresas estatales chinas. Con la crisis de 2008 cambia la tendencia anterior al diversificarse el tipo (ya no serán sólo transnacionales dedicadas a los agro-negocios) sino también inversores financieros) como el origen (se suman países árabes y del sudeste asiático) de los inversores, así como el destino de las inversiones en adquisición de tierras, cobrando mayor relevancia las inversiones en América Latina.

Entre 2000 y 2017 la adquisición de tierras por estas vías fue de 89,8 millones de hectáreas, principalmente en África, tal y como se puede observar en el siguiente gráfico.



En este sentido, destaca el caso de China que, al concentrar una cuarta parte de la población mundial, pero únicamente un 10% de las tierras cultivables, ha venido desarrollando una política de país, ya sea directamente o a través de empresas estatales, para incrementar su disposición de tierras cultivables en extranjero, habiendo realizado inversiones por valor de 94.000 millones de dólares entre 2010 y 2018.

Fuente: La disputa por la tierra a escala mundial. El rol de los estados y los mecanismos de acaparamiento de tierras en el sur global, 2019.

c. Hacer frente al cambio climático

Efectos previstos del cambio climático a escala mundial

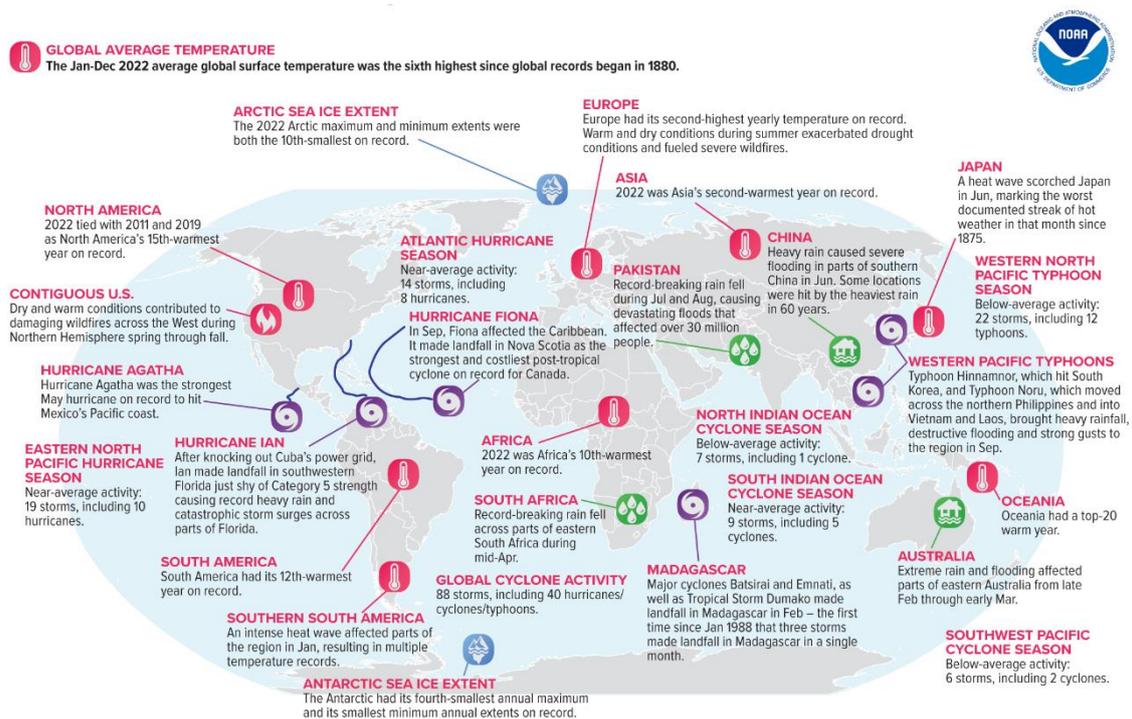
La agricultura es un sector estrechamente dependiente del clima y el suelo. Así, la producción internacional de alimentos está sujeta a anomalías climáticas. Estos fenómenos de difícil predicción tienen una importante afectación en la configuración del precio de las materias primas en los mercados primarios.

En este contexto, el impacto del cambio climático se viene observando desde hace años en los agroecosistemas a escala mundial, y se seguirá produciendo, con mayor o menor intensidad, en los años venideros, en función del grado de mitigación del mismo que se logre alcanzar a nivel mundial.

En este contexto, en las últimas décadas ha amentado la frecuencia de fenómenos climáticos extremos, que en muchos casos (por ejemplo, sequías y temporales) pueden afectar a los cultivos. Por tanto, el cambio climático ya hoy en día está introduciendo una mayor incertidumbre con relación a la producción agraria esperada.

El impacto del cambio climático se seguirá produciendo, con mayor o menor intensidad, en años venideros.

Figura 16. Principales anomalías y eventos climáticos durante el año 2022



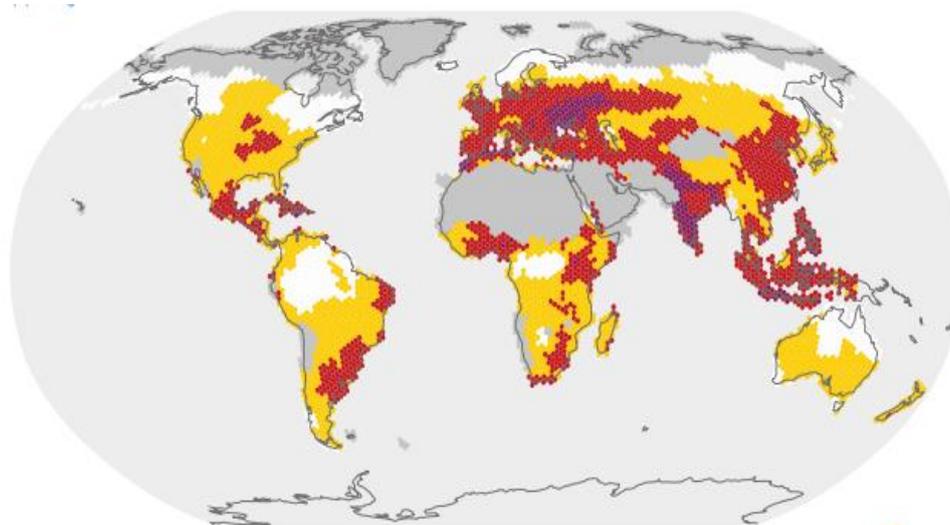
Please note: Material provided in this map was compiled from NOAA's State of the Climate Reports. For more information please visit: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/>

Fuente: Razgulay Group, 2023.

A escala global, las principales afectaciones del cambio climático vendrán derivadas del incremento de temperaturas, una reducción de la disponibilidad de recursos hídricos (sequía), una posible pérdida de biodiversidad, una mayor proliferación de episodios climáticos extremos

y plagas agrarias. Estos fenómenos supondrán en algunos casos la pérdida de los cultivos y, en otros, un menor rendimiento de los mismos.

Figura 17. Mapa del riesgo actual de sequía a nivel global



Nota: El color blanco representa zonas de riesgo bajo, el color amarillo las zonas de riesgo moderado, en color rojo las zonas de alto riesgo y en color rojo oscuro las zonas de muy alto riesgo. Las zonas en gris oscuro representan las zonas desérticas.

Fuente: IPCC Sixth Report, *Extremes, Abrupt Changes and Managing Risks.*, Collins M. et al., 2019.

En este contexto, si bien la situación puede variar en función del cultivo y la zona geográfica, se espera que, en un escenario de calentamiento elevado, en promedio, y en ausencia de medidas adicionales, el rendimiento global de los cultivos a nivel mundial para mediados de siglo disminuya entre un 3% y un 12% y entre un 11% y un 25% para finales de siglo¹². De hecho, los efectos del cambio climático ya se habrían producido desde mediados del siglo XX, habiéndose estimado que la productividad de los cultivos a escala mundial sería un 21% más elevada en caso de no darse la situación de cambio climático¹³.

Se prevé que, como consecuencia del cambio climático, el rendimiento global de los cultivos a nivel mundial descienda entre un 3% y un 12% a mediados de siglo, y entre un 11% y un 25% para finales de siglo.

¹² *Global vulnerability of crop yields to climate change.* Wing, I., De Cian E., Mistry, M. 2021.

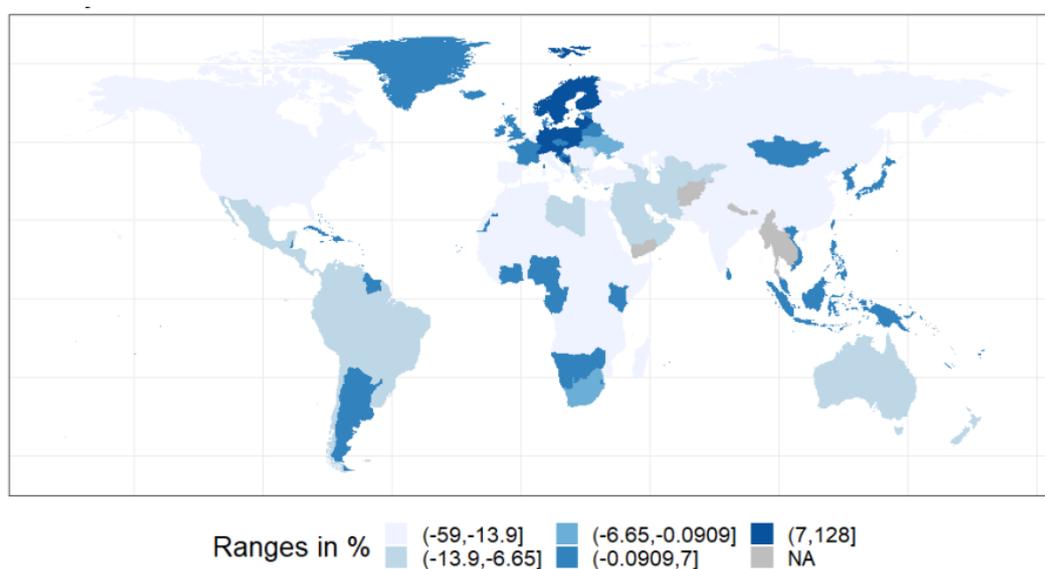
¹³ *Anthropogenic Climate Change Has Slowed Global Productivity Growth.* Ortiz-Bobea, A., 2021.

Pérdidas de rendimiento esperadas como consecuencia del cambio climático

Como consecuencia de las sequías y elevadas temperaturas, se espera que la producción de los principales cultivos se vea gravemente afectada. Se prevé que el maíz sea el cultivo más afectado, con un descenso promedio de su rendimiento de un 24% para 2100 en caso de continuarse con las tendencias actuales respecto al cambio climático (NASA, 2021). La producción de trigo también se verá afectada, a pesar de que en las regiones más frías el rendimiento de este cultivo puede incrementarse en torno a un 5% para 2050, en lugares más vulnerables, como India, Centroamérica y África se reducirá más de un 3% la productividad de este cultivo (IPCC 2022).

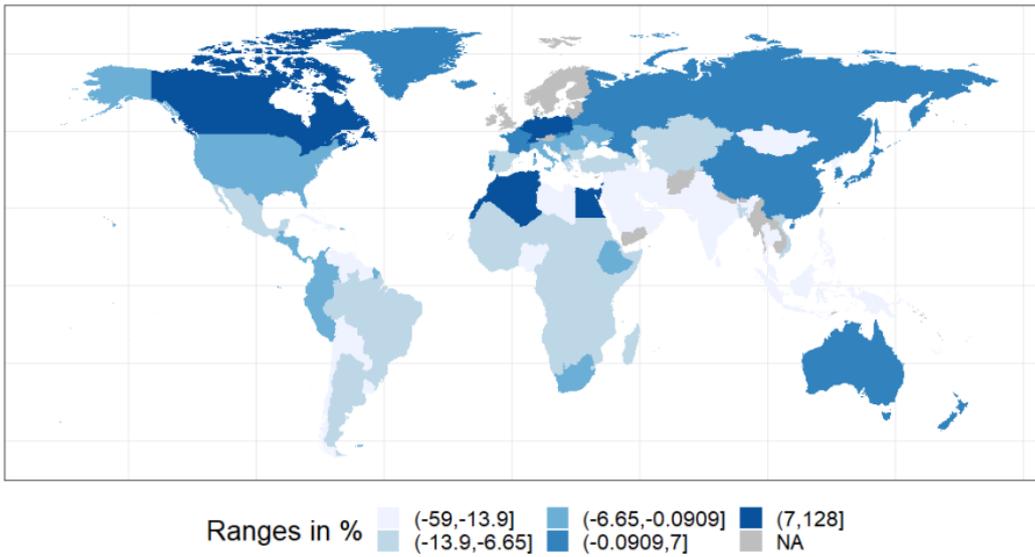
Por otro lado, tubérculos como la patata, plantas leguminosas como la soja, frutales como el plátano y granos como el café o el cacao, también sufrirán una reducción en su productividad en los años venideros.

Figura 18. Variación del rendimiento previsto de la cebada en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010)



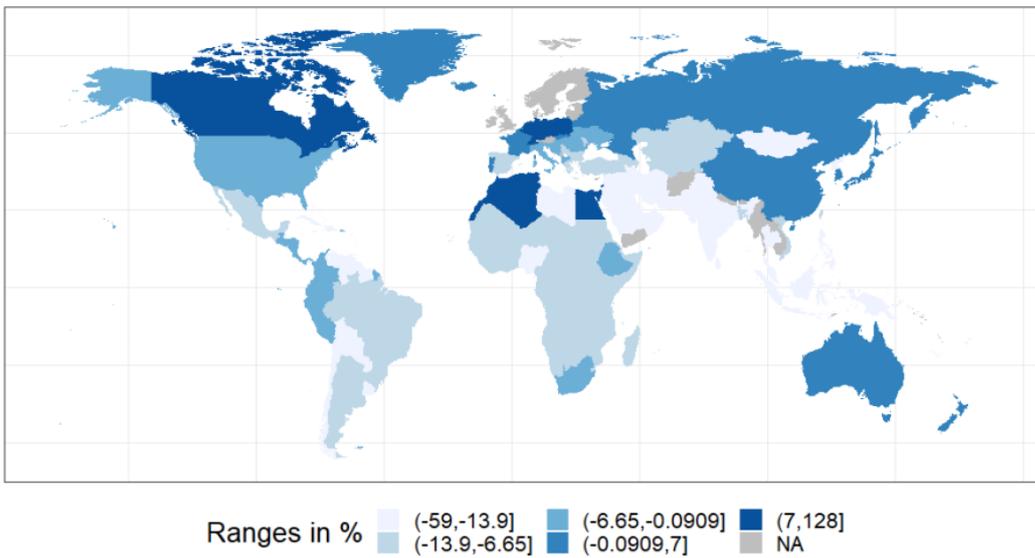
Fuente: Analysis of climate change impacts on EU agriculture bay 2050. JRC PESETA IV project. Hristov et al, 2020.

Figura 19. Variación del rendimiento previsto del maíz en grano en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010)



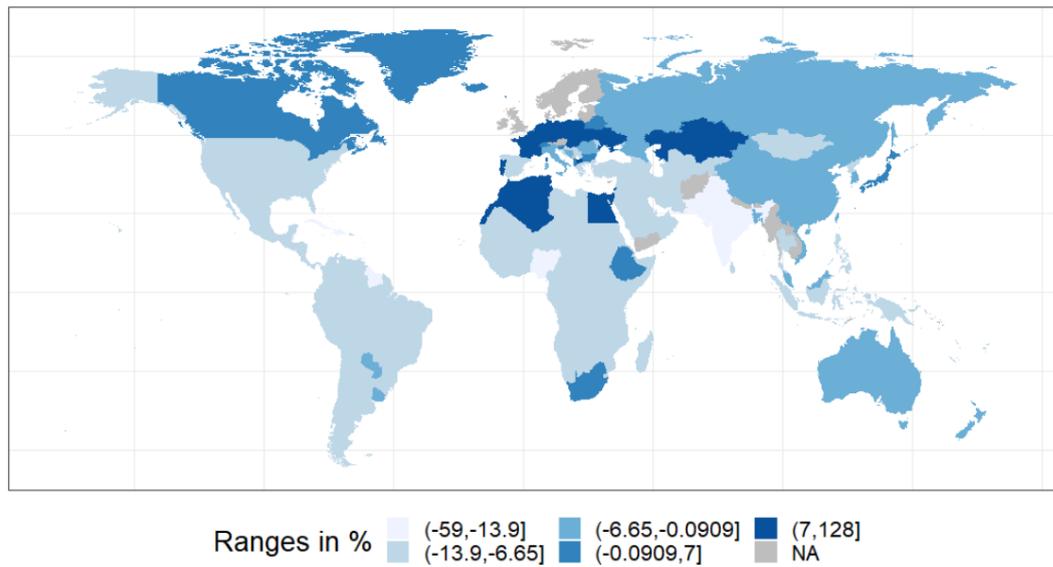
Fuente: Analysis of climate change impacts on EU agriculture bay 2050. JRC PESETA IV project. Hsrstov et al, 2020.

Figura 20. Variación del rendimiento previsto del trigo en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010)



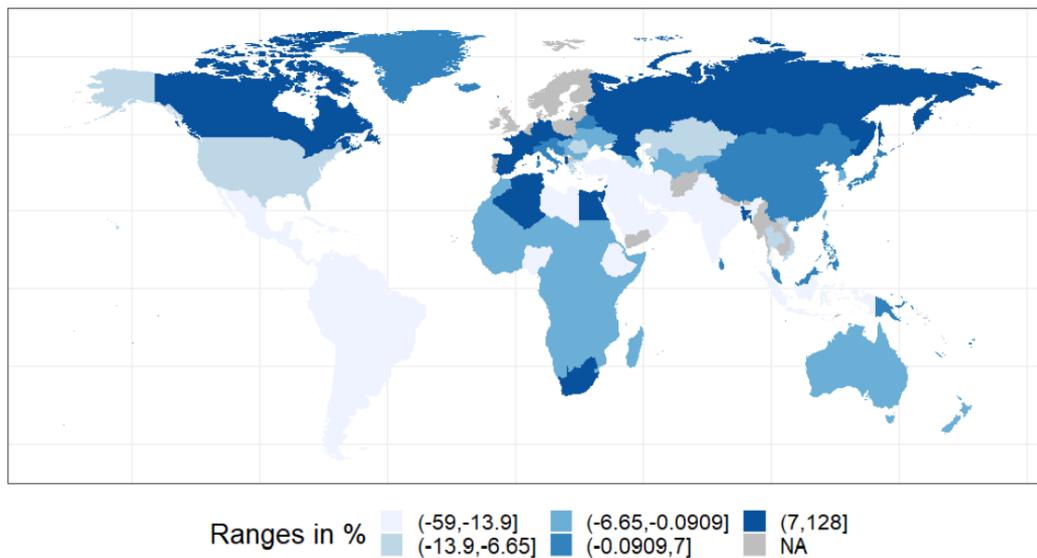
Fuente: Analysis of climate change impacts on EU agriculture bay 2050. JRC PESETA IV project. Hsrstov et al, 2020.

Figura 21. Variación del rendimiento previsto del arroz en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010)



Fuente: Analysis of climate change impacts on EU agriculture bay 2050. JRC PESETA IV project. Hsristov et al, 2020.

Figura 22. Variación del rendimiento previsto de a soja en el escenario 8.5 (cambio climático más severo) para 2050 respecto al escenario base (1981-2010)

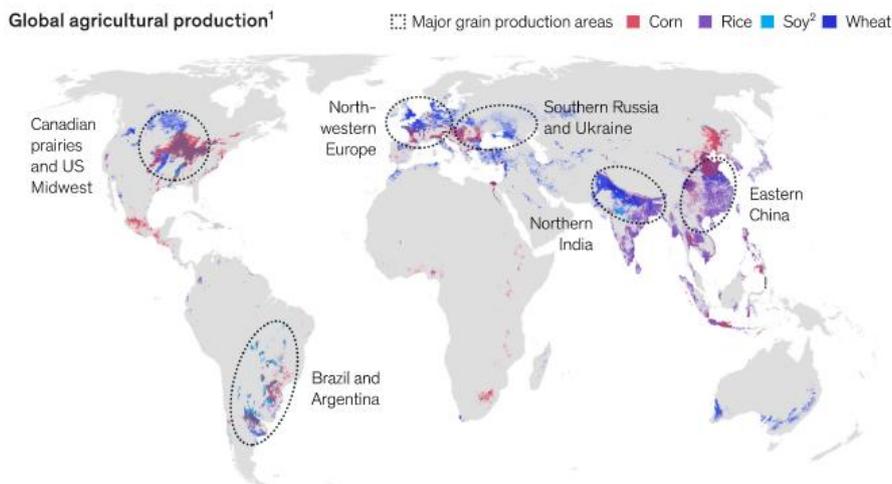


Fuente: Analysis of climate change impacts on EU agriculture bay 2050. JRC PESETA IV project. Hsristov et al, 2020.

En este contexto, debe considerarse que muchos de los **países donde se prevé el mayor impacto sobre el rendimiento a causa del clima, también es donde está concentrada la producción de cultivos básicos a nivel mundial**, su colapso o reducción de la productividad puede tener consecuencias devastadoras para la seguridad alimentaria global¹⁴.

¹⁴ Will the world's breadbaskets become less reliable? McKinsey, 2020.

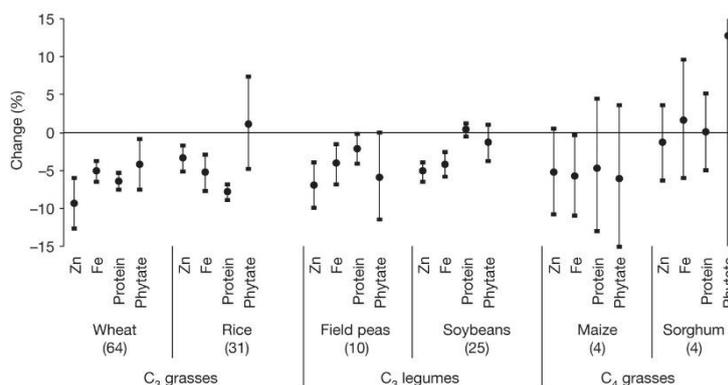
Figura 23. Principales lugares de producción agrícola mundial de maíz, arroz, soja y trigo



Fuente: *Will the world's breadbaskets become less reliable.* McKinsey, 2020.

Más allá de la futura pérdida de productividad debida al cambio climático, éste también puede afectar a la calidad nutricional de los alimentos cultivados. Diversos estudios muestran como a concentraciones mayores de CO₂, la calidad nutricional de diversos cultivos como el trigo, el arroz o los guisantes, pueden llegar a perder entre un 5 y un 10% de su proteína, además de la pérdida de micronutrientes como el zinc y el hierro. En un futuro donde el CO₂ atmosférico será mayor al actual, la pérdida de proteínas y micronutrientes de los alimentos que se cosechen supone una amenaza para la seguridad alimentaria global¹⁵.

Figura 24. Disminución prevista de la presencia de nutrientes en diferentes cultivos a CO₂ elevado (546-586 ppm) en relación con el CO₂ ambiental (aprox. 410 ppm).



Fuente: *Rising CO₂ threatens human nutrition.* Myers, S. et al., 2014.

Asimismo, el cambio climático puede afectar no solo al propio desarrollo de los cultivos, sino que puede tener efectos sobre la proliferación de plagas agrarias: la mayoría de los escenarios de cambio climático favorecen la proliferación de plagas en todo el mundo, especialmente en las regiones templadas, donde la temporada fría limita su desarrollo. Se espera que las especies

¹⁵ *Combining the effects of increased atmospheric carbon dioxide on protein, iron, and zinc availability and projected climate change on global diets: a modelling study.* Beach, R.H., et al. 2019.

invasoras se expandan más fácilmente en estas regiones y que el cambio climático incremente la proliferación de plagas de insectos en el futuro, ya que la temperatura global media seguirá aumentando¹⁶.

Efectos previstos del cambio climático en España

El impacto del cambio climático en España variará en función de factores como la localización geográfica y el tipo de cultivo. No obstante, en general, el aumento de temperaturas incrementará el estrés hídrico, disminuyendo la producción de algunas cosechas. Además, los cambios en la estacionalidad y la variabilidad del clima tendrán un efecto significativo en el rendimiento y, previsiblemente, también en la calidad de los productos agrícolas. La degradación de los suelos y la desertificación limitarán el espacio potencialmente adecuado para determinados cultivos. Por otra parte, es previsible un mayor impacto potencial de los fenómenos meteorológicos extremos (en intensidad y frecuencia)¹⁷, que serán más frecuentes y virulentos. A esto se le unirá la aparición de nuevas plagas y enfermedades¹⁸.

Principales cambios esperados por el cambio climático en España de acuerdo con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030.

- **Aumento de las temperaturas máximas y mínimas:** el aumento es claro y progresivo a lo largo del siglo XXI, mayor en verano y para el escenario de cambio climático más emisoro. Las temperaturas máximas y mínimas del verano y otoño muestran un incremento más intenso que las del invierno y primavera, siendo el calentamiento mayor en las zonas interiores y del este que en las zonas del norte peninsular.
- **Mayor número de días cálidos:** El número de días cálidos muestra un aumento progresivo a lo largo del siglo XXI para todos los escenarios analizados, tanto en la España peninsular como en Baleares y Canarias. Para finales del siglo XXI, en la España peninsular se espera que la proporción de días cálidos se incremente en casi un 50% (con una horquilla entre el 34% y el 58%) para el escenario más emisoro (RCP 8.5) mientras que para el escenario de estabilización RCP4.5, este aumento estará en torno al 24% (con una horquilla entre el 14% y el 31%).
- **Aumento en la duración de las olas de calor:** Las variaciones de este índice no presentan la misma magnitud en todos los lugares de España. Los cambios menores se producirían en Galicia, comunidades de la cornisa cantábrica y La Rioja, y los mayores en las comunidades del levante español, como en la Región de Murcia, en Baleares y especialmente en Canarias.
- **Disminución moderada de las precipitaciones:** Las precipitaciones tienden a disminuir en la mayor parte de España, siendo mayores estos descensos en el cuadrante SO de la Península y en los archipiélagos.

¹⁶ Scientific review of the impact of climate change on plant pests. A global challenge to prevent and mitigate plant-pest risks in agriculture, forestry and ecosystems. FAO, 2021.

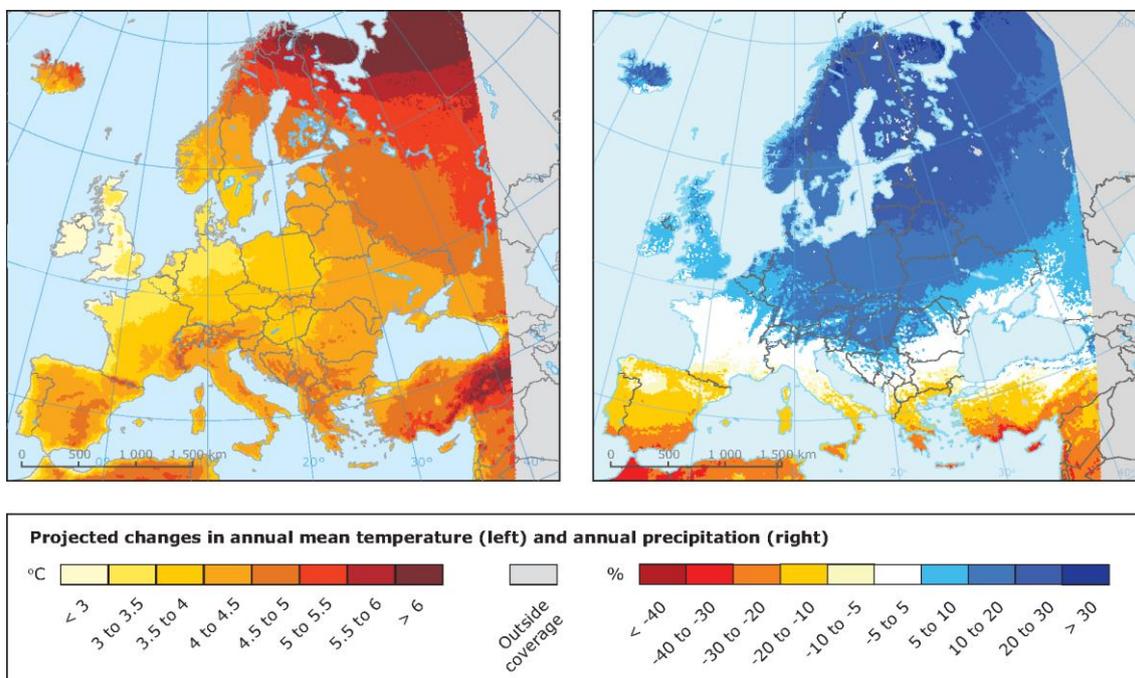
¹⁷ Estos fenómenos ya causan en España la pérdida de al menos el 6% de la producción agraria anual.

¹⁸ Fuente: Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, 2021-2030. Gobierno de España, 2020.

Principales cambios esperados por el cambio climático en España de acuerdo con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030.

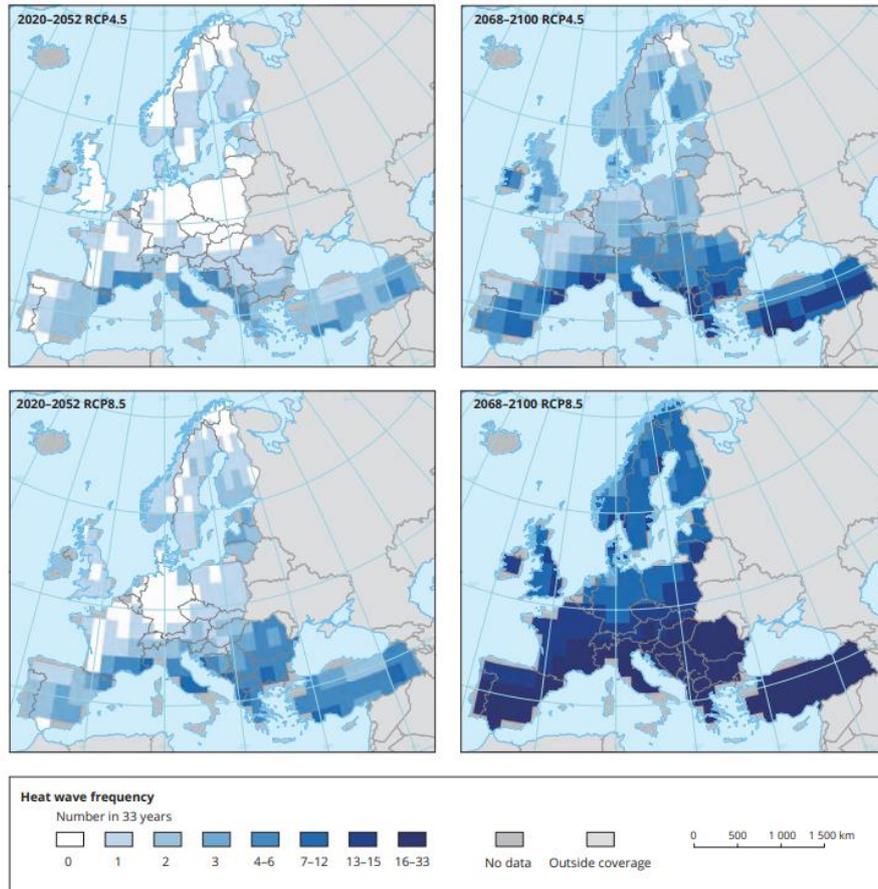
- **Aumento de la evapotranspiración potencial en toda España**, incrementándose más en los escenarios de mayores emisiones y en la medida que se avanza a lo largo del siglo.
- **Disminución de los caudales medios de los ríos**: disminuciones para la mayoría de las cuencas, mayores a medida que avanza el siglo y en los escenarios de mayores emisiones. Las proyecciones resultan más desfavorables en las cuencas andaluzas y en las islas Baleares y Canarias.
- **Disminución de la recarga de los acuíferos**: un reciente estudio realizado por la Comisión Europea estima que, para un calentamiento global de 2°C, la recarga de los acuíferos en España podría reducirse en 3.272 hm³/año, lo que equivaldría a un 15% de la cantidad del agua que anualmente se extrae para los regadíos desde ríos y acuíferos.
- **Incremento de las sequías**: las proyecciones climáticas muestran un futuro en el que las sequías serían más largas y frecuentes, acusándose ese efecto a medida que avanza el siglo XXI. Las sequías de 2 años de duración serán más frecuentes (tendrán un menor periodo de retorno para un mismo déficit) y lo mismo ocurrirá con las sequías de 5 años de duración.
- **Lluvias torrenciales e inundaciones**: de acuerdo con las proyecciones, la reducción de las precipitaciones medias anuales no conllevará necesariamente una disminución de los extremos y, de hecho, se prevé un aumento de episodios de lluvias torrenciales e inundaciones en algunas zonas. Estas precipitaciones torrenciales, debido a su escasa duración no favorecen la recarga de los acuíferos lo que reduce su efecto regulador del ciclo hidrológico.

Figura 25. Cambios proyectados en la temperatura media anual (izquierda) y precipitaciones anuales (derecha)



Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente, 2019.

Figura 26. Olas de calor extremo en función del escenario climático considerado

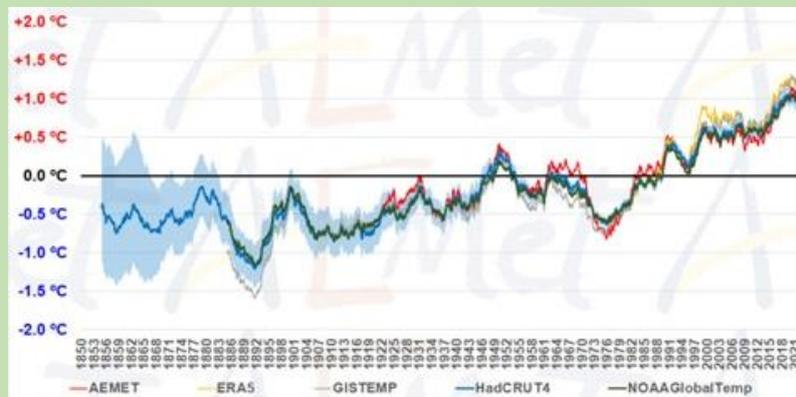


Fuente: Agencia Europea del Medio Ambiente, 2019

Efectos ya existentes del cambio climático en España

España ha sufrido un aumento de la temperatura media de unos 1,2°C desde finales del siglo XIX, y según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, ha ocurrido un alargamiento de los veranos en casi 5 semanas desde 1970, una disminución de los caudales de los ríos, se han incrementado e intensificado de las olas de calor y se ha expandido la aridificación o desertificación del clima, acompañada de sequías cada vez más profundas.

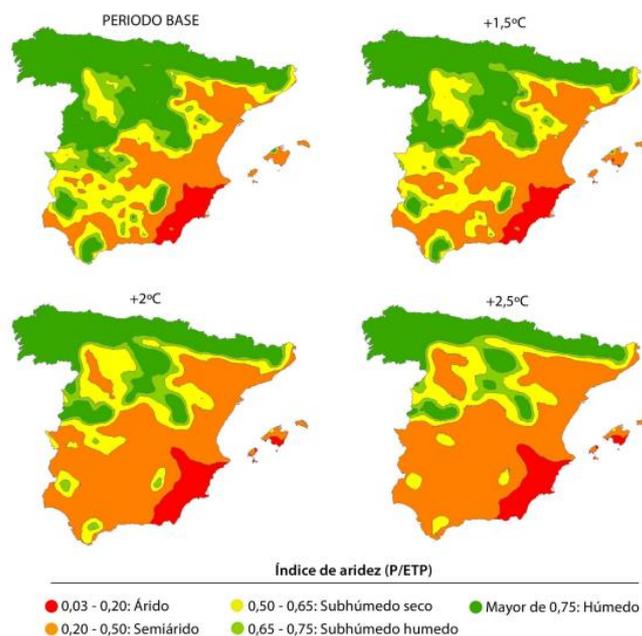
Figura 27 Anomalía de la temperatura en España desde 1850. Período de referencia 1971-2000.



Fuente: AEMET (2022) Informe sobre el estado del clima de España 2021.

Asimismo, el incremento de la temperatura previsto, acompañado del descenso de humedad disponible, incrementará el ritmo de aridificación.

Figura 28. Evolución del índice de aridez en función del incremento de temperaturas que se acabe produciendo



Fuente: MITERD, 2016. Extraído de *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, COAG, 2022.

Incremento de los fenómenos climáticos extremos

Actualmente la siniestralidad causada por los fenómenos climáticos extremos puede llegar a suponer una pérdida de al menos un 6% de la producción agraria cada año. El cambio climático incrementaría la intensidad y frecuencia de estos fenómenos, como parece confirmar el incremento de los daños asociados a los últimos años. Por ejemplo, los pedriscos se producen antes de lo que era habitual, tienen una mayor duración, abarcan extensiones mucho más grandes y presentan una mayor virulencia (Mohr et al, 2015). También ha aumentado la frecuencia e intensidad de otros fenómenos como la sequía (IPCC, 2021), cuya incidencia podría aumentar entre 5 y 10 veces con un calentamiento superior a los 1,5°C o 2°C (MedCC 2020).

Fuente: *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, COAG, 2022.

Ejemplo de fenómeno climático extremo: La primavera de 2023: la más seca jamás registrada en España

Los efectos de la sequía en la agricultura han sido especialmente notables en 2023: los meses de enero a abril han sido los más secos desde 1961, cuando se empezaron los registros, recibiendo menos de la mitad de la lluvia que suele haber en los 4 primeros meses del año. Este hecho viene acompañado de que el año anterior, 2022, fue el sexto año más seco y el más caluroso desde 1961. Las lluvias acumuladas fueron un 16% menores que el promedio y la temperatura media diaria superó los 15 °C por primera vez¹⁶.

Este hecho se ha traducido en la pérdida de gran parte de los cultivos extensivos de secano. En mayo de 2023 se anticiparon pérdidas de hasta el 80% de los cultivos de la temporada, siendo especialmente afectados el trigo (con una producción anual un 35% inferior a la de la temporada anterior) y la cebada (con una producción anual un 32% a la de la temporada anterior), cuya cosecha se ha dado por perdida en gran parte del territorio. Asimismo, en las explotaciones de frutales, la sequía amenaza la viabilidad de los árboles y es posible que muchos agricultores se vean obligados a arrancar los árboles al no poder hacer riegos de supervivencia.

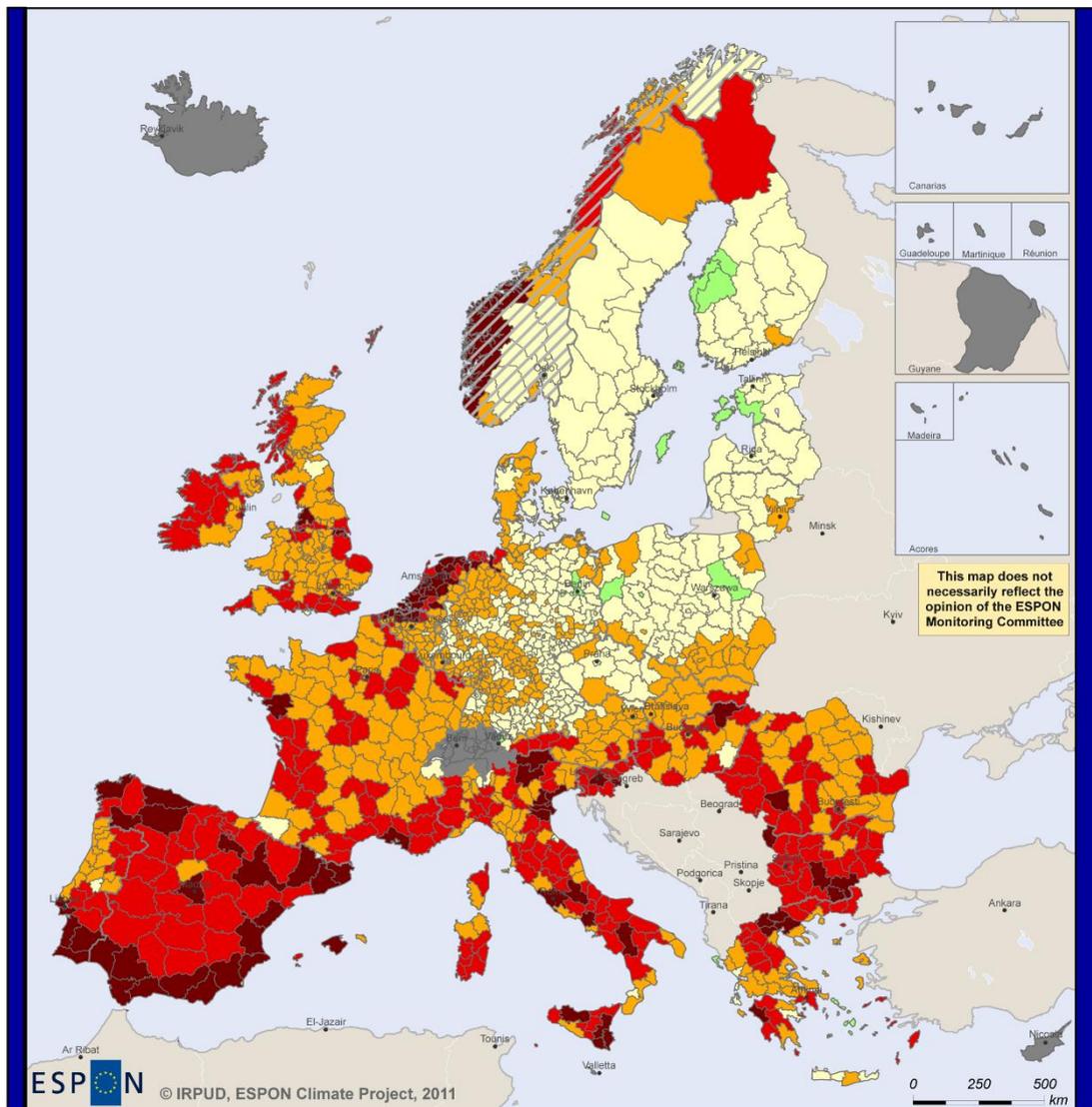
Incremento de plagas y patógenos

La sensibilidad de los patógenos y diversas plagas a los factores climáticos sugiere que el cambio climático puede aumentar la aparición e intensidad de algunas enfermedades, o en las zonas de clima cálido como el mediterráneo, favorecer el establecimiento de especies exóticas invasoras o de nuevas plagas y enfermedades (AEA 2007; EFSA 2020).

Fuente: MITERD, 2016. *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, COAG, 2022.

¹⁹ La primavera de 2023 fue la más cálida y la segunda más seca de la serie histórica. AEMET, 2023

Figura 29. Potencial de impacto agregado del cambio climático en las diferentes regiones de la Unión Europea



Origin of data: see data sources of the individual impact dimensions

Aggregate potential impact of climate change

- highest negative impact (0.5 - 1.0)
- medium negative impact (0.3 - <0.5)
- low negative impact (0.1 - <0.3)
- no/marginal impact (>-0.1 - <0.1)
- low positive impact (-0.1 - >-0.27)
- no data*
- reduced data*

Weighted combination of physical (weight 0.19), environmental (0.31), social (0.16), economic (0.24) and cultural (0.1) potential impacts of climate change. Weights are based on a Delphi survey of the ESPON Monitoring Committee.

Impact calculated as combination of regional exposure to climatic changes and recent data on regional sensitivity. Climatic changes derived from comparison of 1961-1990 and 2071-2100 climate projections from the CCLM model for the IPCC SRES A1B scenario.

*For details on reduced or no data availability see Annex 9.

Fuente: Proyecto ESPON, Agencia Europa del Medio Ambiente, 2011.

En este contexto, a nivel español, si bien no existe una aproximación global respecto a la disminución del rendimiento del conjunto de los cultivos, sí se han realizado estudios específicos para algunos de los cultivos de mayor importancia, como los cereales. En este sentido, a

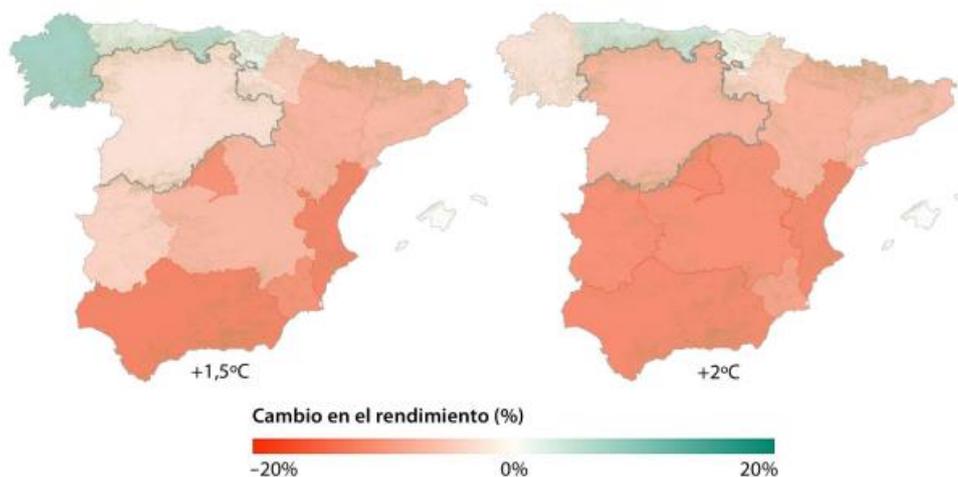
continuación, se muestran las previsiones existentes respecto a estos cultivos, recogidas en el marco de la publicación *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, publicada por COAG en 2022.

Pérdidas de rendimiento previstas en el caso de los cereales

La gran dependencia del clima convierte al calentamiento global en la mayor de las amenazas para estos cultivos, ya que podría modificar la duración de la estación de crecimiento, reducir la disponibilidad del agua y aumentar el estrés térmico. Aunque la mayor concentración de CO₂ atmosférico también aumentaría la eficiencia en el uso de agua en el maíz o la tasa de fotosíntesis en el caso del trigo, no llegaría a compensar el resto de las pérdidas. De hecho, se podría esperar una disminución media del 5% del rendimiento de los cereales a escala global por cada grado centígrado de calentamiento si no se realiza ninguna medida de adaptación (Nature 2014), aunque con una importante variabilidad según zonas y años. En zonas meridionales de Europa, como España, donde la escasez de agua ya es un factor limitante de la producción agrícola, el aumento de las temperaturas y, principalmente el número e intensidad de las sequías en primavera, provocarían una **pérdida significativa de rendimiento de cereales de invierno como el trigo. Estas pérdidas podrían alcanzar más de un 15% en algunas zonas respecto al histórico de 1981-2010 con un calentamiento de 2°C. Estas pérdidas de rendimiento serían menores en el caso de la cebada, pero podrían llegar hasta casi el 20% en el caso de cultivos muy ligados a los cereales, como el girasol en zonas como Andalucía.**

Fuente: *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, COAG, 2022.

Figura 30. Cambios porcentuales medios del rendimiento de trigo en relación con el pasado reciente (1981-2010) para los escenarios de altas emisiones (RCP 8.5), con un calentamiento de 1,5°C en el periodo 2018-2029 (izquierda) y 2°C en 2030-2044 (derecha)



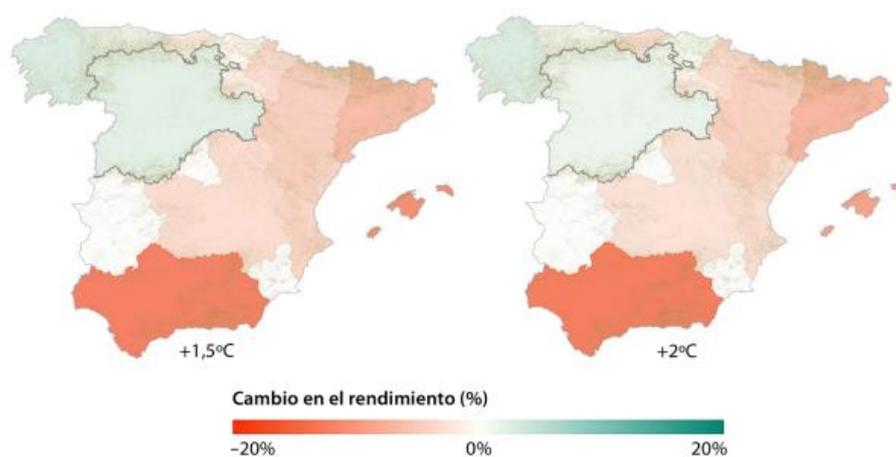
Fuente: Hristov et al. 2020. Extraído de *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, COAG, 2022.

Pérdida de rendimiento: el caso concreto del maíz

En el caso del maíz, el aumento de la temperatura y el descenso de las precipitaciones provocarían en Europa un descenso del rendimiento superior al 20%, con **pérdidas de cosecha de hasta el 80% en algunos países del sur (entre ellos España) si no se pudiera mantener el riego por posibles restricciones hídricas** (Hristov et al 2020). De hecho, aunque se dispusiera de suficiente agua para mantener el riego, el cambio climático también reduciría sustancialmente los rendimientos en la mayoría de los países productores de la UE, fundamentalmente por sus efectos en la polinización (Lizaso 2014), aunque con resultados más desiguales según regiones. Las repercusiones más graves se prevén para el sur de Europa, donde **el rendimiento podría disminuir hasta cerca de un 20% en regiones como Andalucía con un calentamiento de 2°C.**

Fuente: *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, COAG, 2022.

Figura 31. Cambios porcentuales medios del rendimiento del maíz de regadío en relación con el pasado reciente (1981-2010) para los escenarios de altas emisiones (RCP 8.5), con un calentamiento de 1,5°C en el periodo 2018-2029 (izquierda) y 2°C en 2030-2044 (derecha)



Fuente: Hristov et al. 2020. Extraído de *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, COAG, 2022.

Afectación sobre el cultivo de cereales de la mayor proliferación de plagas y patógenos

Por la dificultad de estudiar distintos elementos de forma conjunta, las previsiones mostradas anteriormente no tienen en cuenta otros factores como las plagas. Diversos autores han intentado estudiar estos factores y así, por ejemplo, Deutsch et al. 2018 concluyeron **que un incremento de 2°C podría incrementar las pérdidas asociadas a éstas en un 60% en el caso del trigo y un 15% para el maíz en España**, debido a que el calentamiento favorece el crecimiento de la población y la tasa metabólica de los insectos.

Fuente: *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, COAG, 2022.

A las reducciones de rendimiento indicadas hasta el momento para los cereales, deberían añadirse las que se producirán por la mayor proliferación de episodios climáticos extremos.

Figura 32. Resumen de los efectos potenciales del cambio climático en los cereales en España por tipo de riesgo

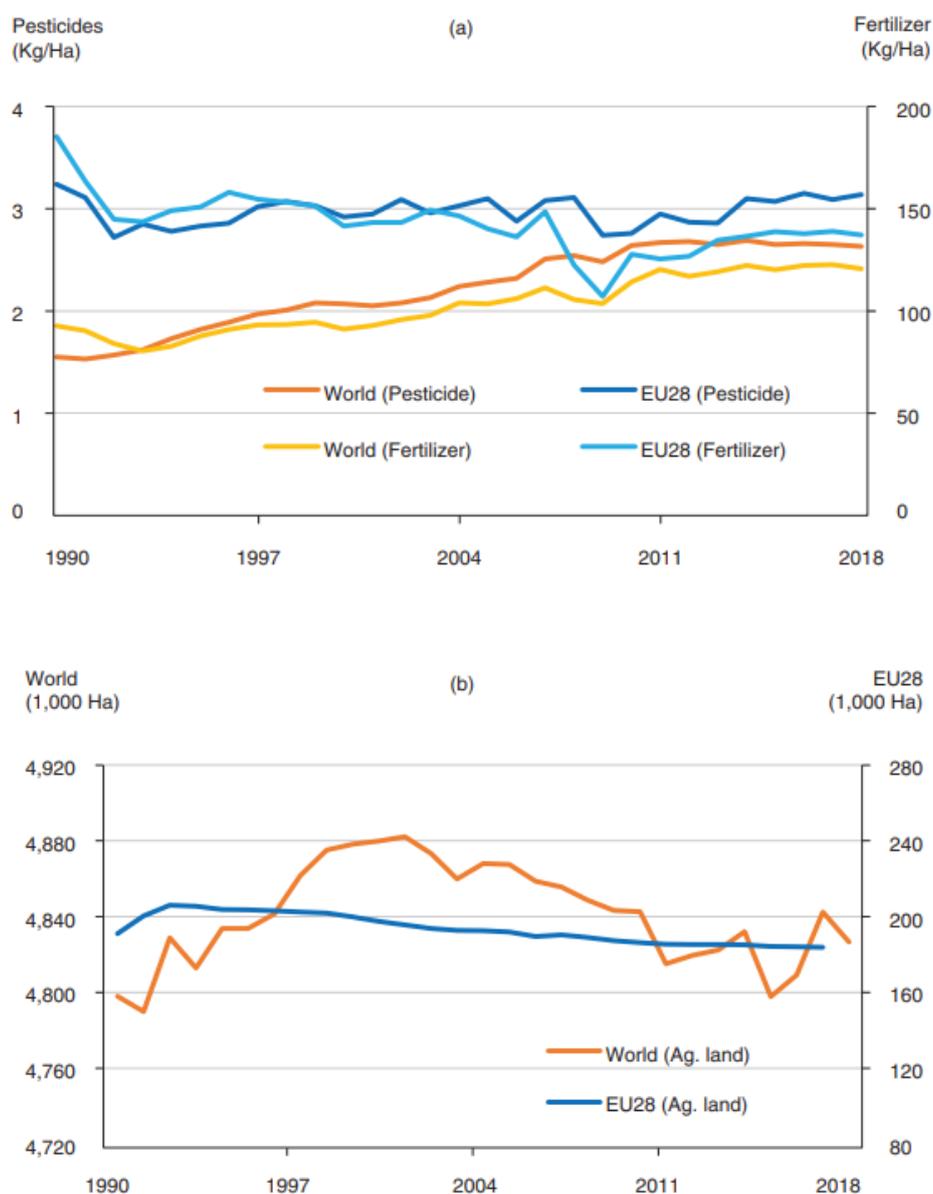
FACTOR DE CAMBIO	POSIBLES BENEFICIOS	POSIBLES EFECTOS NEGATIVOS
Aumento de temperaturas		Aumento del estrés térmico. Aumento daños por plagas. Mayor riesgo de incendios.
Disminución de la precipitación		Aumento del estrés hídrico. Aumento demanda de agua en regadío. Mayor riesgo de incendios.
Aumento de lluvias intensas o tormentas		Aumento de la erosión. Daños en las plantas por inundaciones o pedriscos.
Aumento de concentración de CO ₂	Incremento fotosíntesis. Mayor eficiencia en agua.	Descenso de la calidad del trigo.

Fuente: *Empieza la cuenta atrás. Impactos del cambio climático en la agricultura española*, COAG, 2022.

d. Una transición a sistemas de cultivo más sostenibles

Aunque la agricultura moderna ha tenido éxito en aumentar la producción alimentaria, lo ha hecho a un elevado coste energético y mediante un uso intensivo de fertilizantes, fitosanitarios y recursos hídricos.

Figura 33. Consumo de fertilizantes, fitosanitarios (a) y suelo (b) entre 1990 y 2018 a nivel mundial y en la UE 28



Note: Kg/Ha refers to kilograms per hectare.

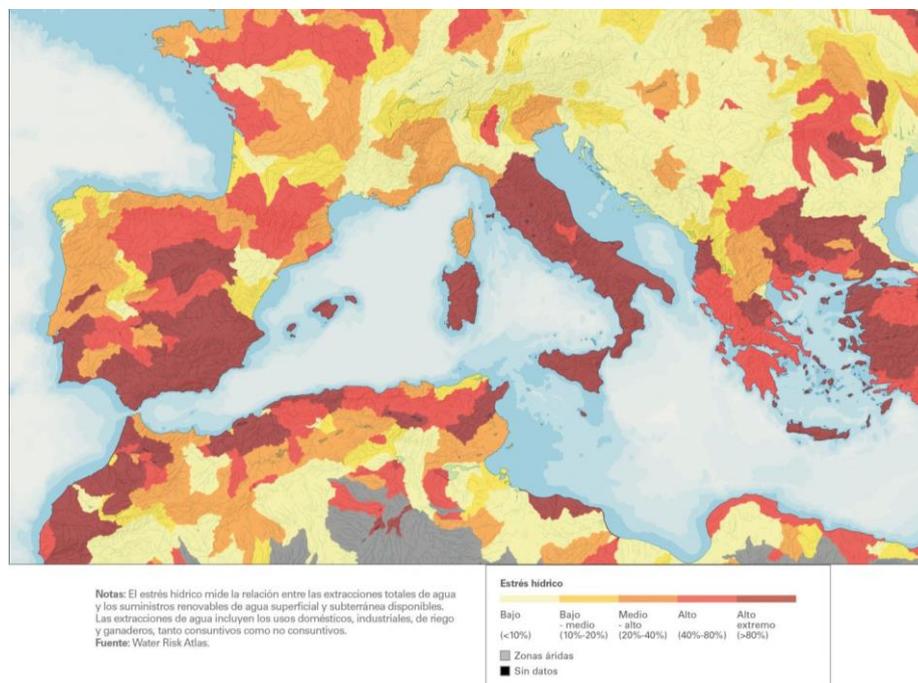
Source: United Nations, 2020.

Fuente: *Economic and Food Security impacts of Agricultural Input Reduction Under the European Union Green Deal's Farm to Fork and Biodiversity Strategies*. United States Department of Agriculture, 2020.

En este sentido, los métodos productivos y el tipo de alimento producido tienen impactos significativos en el uso de recursos naturales (agua, energía y nutrientes) y en las consecuencias que generan (cambio climático, contaminación, residuos, biodiversidad, etc.). Estos impactos pueden llegar a comprometer la capacidad de producción y rendimientos de la agricultura a futuro.

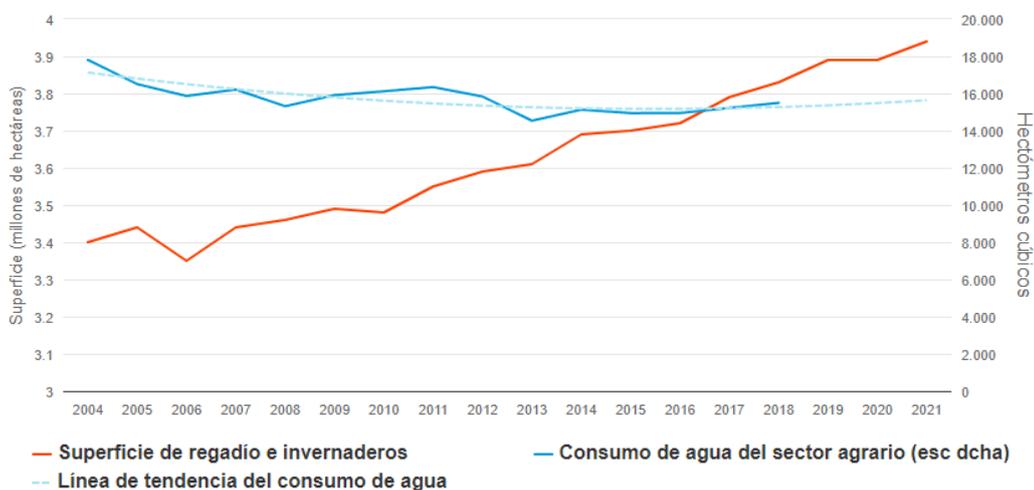
En este sentido, en España la agricultura consume un 82,1%²⁰ de los recursos hídricos (un porcentaje superior al existente a escala mundial, de un 70%) y juntamente con la ganadería, la silvicultura y la pesca, un 3,3%²¹ de la energía consumida en el país. A estos consumos de recursos debe sumarse el consumo de fertilizantes y fitosanitarios.

Figura 34. Estrés hídrico en el sur de Europa



Fuente: Extraído de *El uso del agua en la agricultura: avanzando en la modernización del regadío y la gestión eficiente del agua*. Monturiol, J., CaixaBank Research, 2022.

Figura 35. Evolución de la superficie irrigada y del consumo de agua por parte de la agricultura en España



Fuente: CaixaBank Research, a partir de datos del INE (EUASA) y del MAPA (ESYRCE).

CaixaBank Research

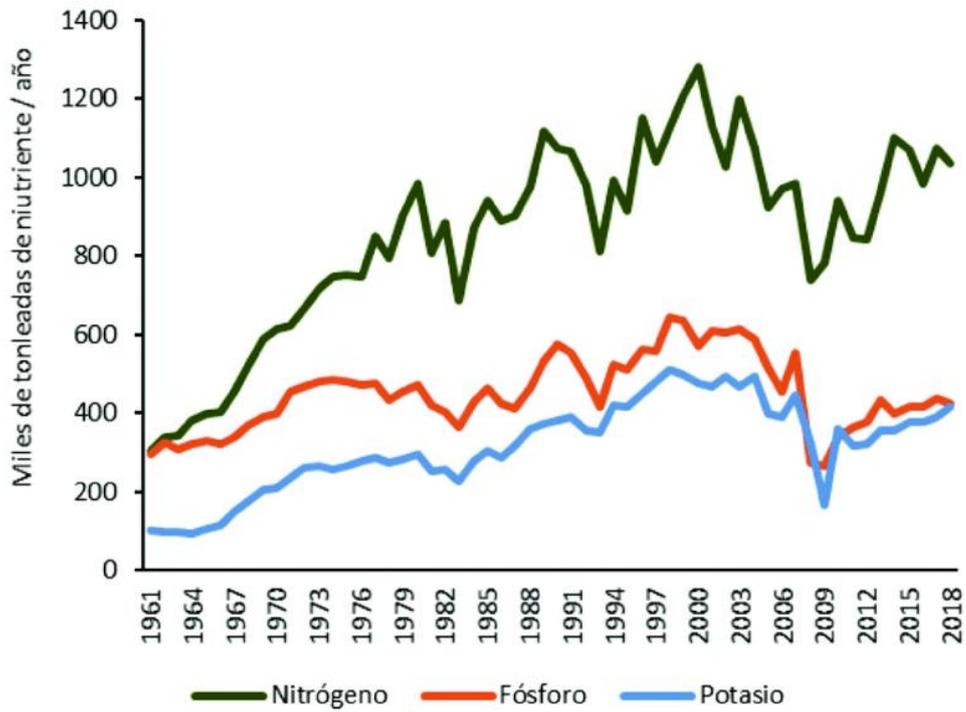
Última actualización: 25 marzo 2022 - 12:45

Fuente: CaixaBank Research, 2022 a partir de datos del INE (EUASA) y del MAPA (ESYRCE).

²⁰ Datos de la cuenta satélite del agua (INE) del 2010, último dato disponible. La gran parte del agua usada por el sector agrario se destina a regadío.

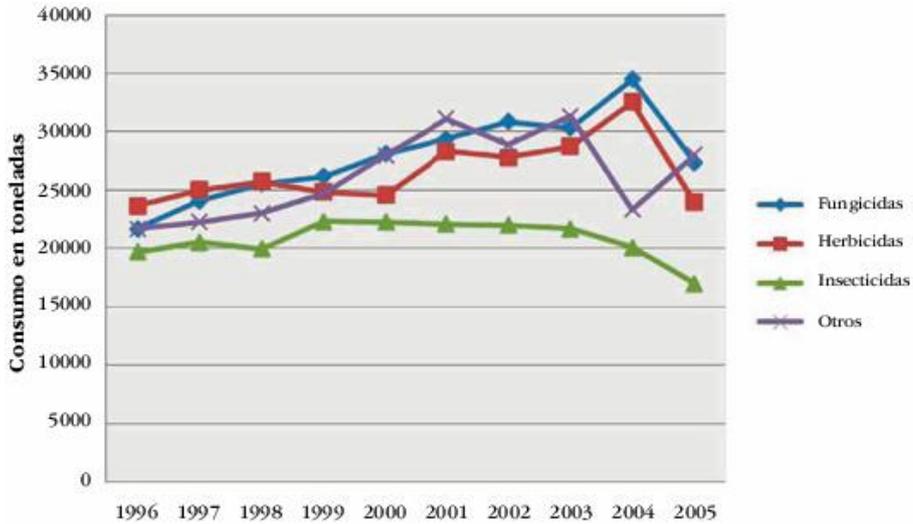
²¹ Instituto Nacional de Estadística, 2019.

Figura 36. Evolución del consumo de fertilizantes en la agricultura española (1961-2018)



Fuente: Puidueta, I., a partir de datos de base de la FAO en España.

Figura 37. Evolución del consumo de fitosanitarios en la agricultura española 1996-2005

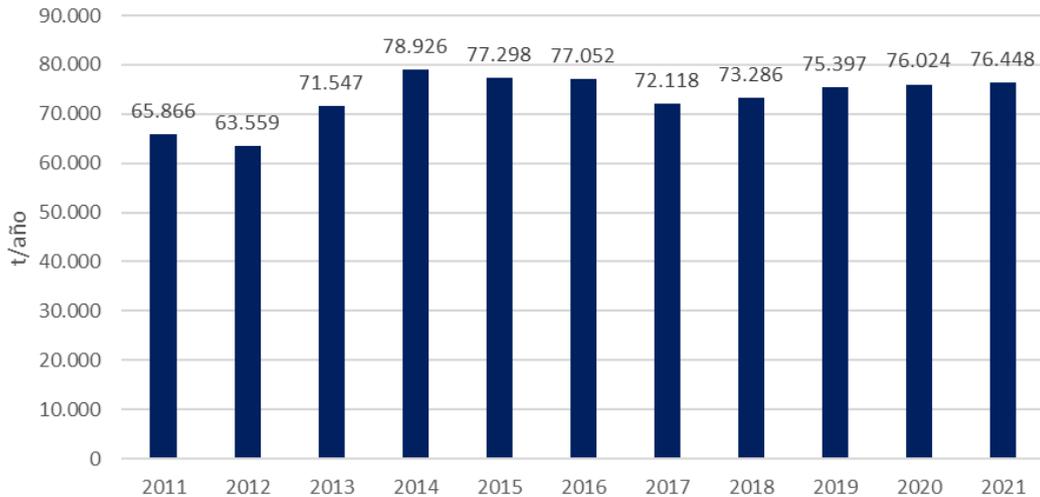


* AEPLA: Asociación Empresarial para la Protección de las Plantas

** Otros: Este grupo incluye sustancias activas acaricidas, nematocidas y molusquicidas

Fuente: Vila-Rodríguez, J., 2014.

Figura 38. Evolución del consumo de fertilizantes en la agricultura española 2011-2021



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de base del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

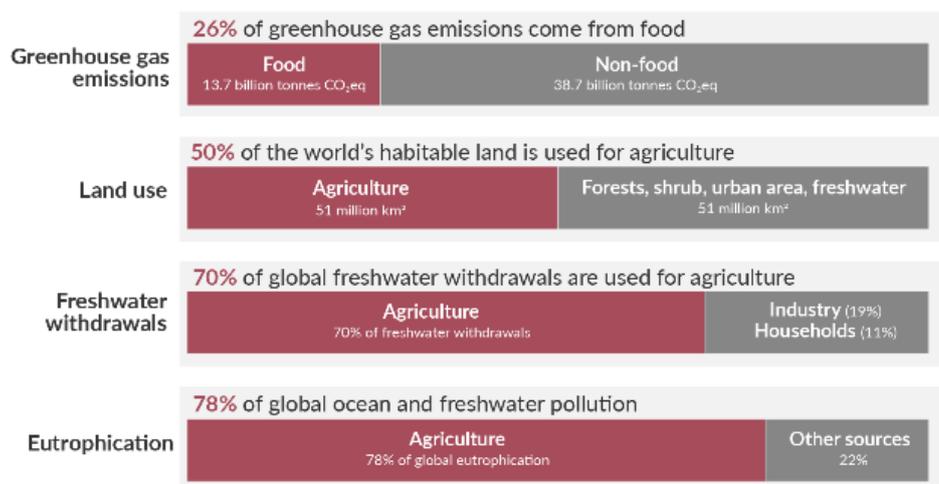
La agricultura no solo debe hacer frente al consumo de recursos (no renovables y renovables por encima de su capacidad de recarga), a los desafíos del cambio climático y a la restricción de la expansión de las zonas de cultivo para proteger a los ecosistemas, sino que también tiene que reducir el impacto ambiental generado por la propia actividad, con objeto de garantizar la sostenibilidad de la producción de alimentos a largo plazo.

En este contexto, el uso excesivo de fitosanitarios y fertilizantes puede tener efectos negativos en la salud humana, la biodiversidad y la calidad del suelo y del agua, además de contribuir al deterioro de la calidad del aire. Estos productos, sin un correcto manejo, pueden contaminar las masas de agua, causar la eutrofización de los ecosistemas acuáticos y dañar la vida acuática.

El uso excesivo de fertilizantes puede resultar en la lixiviación de nutrientes hacia las masas de agua subterránea, lo que provoca la contaminación de los acuíferos y la disminución de la calidad del agua potable. Por otro lado, los fitosanitarios utilizados en la agricultura tienen el riesgo de afectar a los polinizadores y a otros organismos beneficiosos, lo que repercute en la salud de los ecosistemas y en la producción de alimentos.

Otro impacto ambiental significativo de la agricultura es la emisión de gases de efecto invernadero. Las prácticas agrarias, como el cultivo del arroz, o el uso de maquinaria agrícola, contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). De hecho, un 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero globales, provienen del sistema alimentario (si bien con un peso elevado de la ganadería).

Figura 39. Impactos ambientales de la producción de alimentos y la agricultura a escala global



Fuente: OurWorldinData, a partir de Poore y Nemecec, 2018, FAO, AQUASTAT y Bar-On et al, 2018.

Los impactos ambientales de la agricultura española

En lo que se refiere a los impactos del sector agrícola sobre el medio ambiente en España, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, en 2020 éste fue el causante del 14% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en España, generando 9,92 millones de toneladas de CO₂, 964,74 miles de toneladas de CH₄ y 46,97 miles de toneladas de N₂O. Prácticamente la mitad de estas emisiones fueron generadas por el uso de fertilizantes y la gestión de los suelos.

Por otra parte, en base a datos del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, la contaminación por nitratos afecta al 22% de las masas de agua superficiales y el 23% de las masas de agua subterráneas, aumentando un 51,5% en solo cuatro años, de 2016 a 2019, y cuyo principal contribuidor es el sector agroalimentario, si bien con un peso elevado de la ganadería.

En este contexto, dado el potencial impacto negativo de la agricultura sobre los ecosistemas, resulta necesario reducir la utilización de insumos y la adopción de técnicas que permitan la sostenibilidad de los agrosistemas a largo plazo. Para lograr este objetivo, desde la Unión Europea se ha lanzado la Estrategia de la Granja a la Mesa (Farm to Fork -F2F-), para un sistema alimentario justo, saludable y respetuoso con el medio ambiente.

Dado el potencial impacto negativo de la agricultura sobre los ecosistemas, resulta necesario reducir la utilización de insumos y adoptar técnicas que permitan la sostenibilidad de los agrosistemas a largo plazo.

La estrategia europea de la Granja a la Mesa (Farm to Fork): beneficios y otros aspectos a considerar

Tras la crisis financiera global iniciada el año 2008, la UE lanzó diferentes iniciativas con objeto de alcanzar una economía y una agricultura sostenibles. La más ambiciosa de estas políticas es

el European Green Deal que busca alcanzar la neutralidad climática de la economía europea en 2050.

En el marco del European Green Deal, la Comisión Europea definió la estrategia Farm to Fork, cuyo objetivo es transformar la forma de producir y consumir alimentos en Europa para: reducir la huella medioambiental de los sistemas alimentarios, reforzar su resiliencia frente a las crisis y seguir garantizando la disponibilidad de alimentos saludables y asequibles también a las generaciones futuras.

Principales retos de la Estrategia Farm to Fork en relación a los cultivos vegetales

- *Causar un impacto positivo o medioambientalmente neutro, preservando los recursos hídricos, promoviendo la mitigación del cambio climático y la adaptación a éste, cuidando del suelo, los mares, lagos y ríos, la calidad del aire y la biodiversidad animal y vegetal de los ecosistemas.*
- **Asegurar la seguridad alimentaria para la población mundial, mediante un acceso indiscriminado y constante a alimentos nutritivos y sostenibles.**
- *Mantener la producción de alimentos, asegurando la sostenibilidad económica, social y medioambiental de todos los eslabones de la cadena.*

Para conseguir estos retos, la estrategia plantea los siguientes objetivos en cuanto al uso de fitosanitarios y fertilizantes y uso del suelo para la producción agrícola.

Principales retos de la Estrategia Farm to Fork en relación a los cultivos vegetales

- *Reducir en un 50% el uso de los fitosanitarios más peligrosos para 2030.*
- *Reducir el uso de fertilizantes en al menos un 20% para 2030.*
- *Reducir las pérdidas de nutrientes en al menos un 50%, al tiempo que se garantiza que no se deteriore la fertilidad del suelo.*
- *Incrementar la producción ecológica hasta alcanzar el 25% de las tierras cultivables de la UE en 2030.*

En este sentido, la nueva política agraria común, aplicada desde el 1 de enero de 2023, es una de las principales herramientas para el desarrollo de la Estrategia.

Por otro lado, la Estrategia Farm to Fork, más allá de establecer objetivos para los sistemas agroalimentarios europeos, tiene una dimensión externa que pretende dinamizar la transformación de los sistemas alimentarios mundiales para hacerlos más sostenibles, saludables y resilientes. En este sentido, el objetivo es integrar este enfoque en los futuros acuerdos comerciales a firmar con terceros países, que operaría como una adición al capítulo de cuestiones sanitarias y fitosanitarias.

Las simulaciones realizadas permiten estimar que la consecución de los objetivos de la Estrategia permitiría reducir los impactos europeos, si bien, no se ha evaluado, hasta el momento, si parte de estos impactos no serían transferidos a otras zonas del planeta.

En este sentido, tal y como se ve en la siguiente tabla, se espera que la aplicación conjunta de las estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad permitirían reducir para 2030 (respecto al escenario base 2014-2020) las emisiones de gases de efecto invernadero del sistema alimentario en un 20,3%, además de reducirse los impactos asociados a la sobrefertilización.

Figura 40. Efectos ambientales de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad de la UE en 2030 respecto al escenario base (2014-2020)

Environmental impact		F2F and BDS targets and CAP 2014-2020scenario
Nitrogen	Surplus	-33.5
	Leaching	-36.2
Ammonia	Mineral	-39.3
	Manure	-31.5
	Total	-33.0
CH ₄	Enteric fermentation	-14.6
	Manure	-12.2
N ₂ O	Mineral fertiliser	-40.4
	Manure	-3.2
Non-CO ₂ GHG (CO ₂ eq)	Total	-14.8
Leakage	% of domestic reduction	66.0
Non-CO ₂ and CO ₂ emissions	Total	-20.3

Fuente: *Modelling environmental and climate ambition in the agricultural sector with the CAPRI MODEL. Exploring the potential effects of selected Farm to Fork and Biodiversity strategies targets in the framework of the 2030 Climate targets and the post 2020 Common Agricultural Policy.* Barreiro-Hurle et al., JRC., 2021.

En este contexto, si bien se espera que la aplicación de la Estrategia Farm to Fork tenga un impacto positivo en la reducción de los impactos ambientales asociados al sistema agroalimentario, también se espera que la aplicación de la misma suponga una reducción de los rendimientos agrarios en el continente, estimados, por el Joint Research Center²² en reducciones de entre un 5 y un 15%^{23,24}.

La aplicación de la Estrategia F2F permitirá reducir los impactos ambientales asociados al sistema agroalimentario. No obstante, la aplicación de la misma sin medidas adicionales supondría una reducción de los rendimientos agrícolas de entre un 5% y un 15%.

²² El Joint Research Center es una Agencia de la Comisión Europea que tiene por objetivo proporcionar conocimientos científicos basados en datos contrastados y contribuir a que las políticas de la UE tengan un impacto positivo en la sociedad.

²³ *Modelling environmental and climate ambition in the agricultural sector with the CAPRI MODEL. Exploring the potential effects of selected Farm to Fork and Biodiversity strategies targets in the framework of the 2030 Climate targets and the post 2020 Common Agricultural Policy.* Barreiro-Hurle et al., JRC., 2021.

²⁴ Más allá del estudio del JRC y del Economic Research Service del USDA (Economic and Food Security Impacts of Agricultural Input Reduction Under the European Union Green Deal's Farm to Fork and Biodiversity Strategies. Beckman, L., et al, USDA, 2021.), que se analizan a continuación, diversos estudios de ámbito europeo llegan a las mismas conclusiones que estos:

- *Impact Assessment Study on EC 2030 Green Deal Targets for Sustainable Food Production.* Wageningen. Wageningen Economic Research, 2021.

En este sentido, la reducción de estos rendimientos, juntamente con los cambios previstos en las superficies cultivadas llevarían a una reducción de la producción agrícola de la Unión Europea (especialmente significativa en el caso de algunos cultivos, como el trigo).

Figura 41. Resumen de los principales impactos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad, bajo tres escenarios.

	European Union	United States	Worldwide
Scenario: EU adoption only			
Production (percent change)	-12	0	-1
Prices (percent change)	17	5	9
Imports (percent change)	2	-3	-2
Exports (percent change)	-20	6	2
Gross farm income (percent change)	-16	6	2
Increase in food cost (annual per capita change in U.S. dollars)	153	59	51
Increase in food insecurity ² (millions of people)	na ¹	na	22
GDP (change, in billions of U.S. dollars)	-71	-2	-94
Scenario: middle³			
Production (percent change)	-11	0	-4
Prices (percent change)	60	1	21
Imports (percent change)	-10	-7	-9
Exports (percent change)	-10	-2	-9
Gross farm income (percent change)	8	1	4
Increase in food cost (annual per capita change in U.S. dollars)	651	16	159
Increase in food insecurity (millions of people)	na	na	103
GDP (change, in billions of U.S. dollars)	-186	<-1	-381
Scenario: global adoption			
Production (percent change)	-7	-9	-11
Prices (percent change)	53	62	89
Imports (percent change)	-5	-15	-4
Exports (percent change)	2	3	4
Gross farm income (percent change)	15	34	17
Increase in food cost (annual per capita change in U.S. dollars)	602	512	450
Increase in food insecurity (millions of people)	na	na	185
GDP (change, billions of U.S. dollars)	-133	-74	-1,144

Notes: ¹na = not applicable; ²Food insecurity is estimated for 76 low- and middle-income countries and not the full set of countries in the Global Trade Analysis Project – AgroEcological Zones (GTAP-AEZ) model; ³In the middle scenario, we assume that trade partners who depend on food and agricultural exports to the EU or that have close colonial ties adopt the Strategies to maintain their trading relationship with the EU. The regions that we assumed adopt the Strategies in this scenario are European Free Trade Association (EFTA) countries (Iceland, Liechtenstein, Norway, and Switzerland); other European countries; Turkey; Ukraine; the Middle East and North Africa; and Africa.

The gross farm income calculation is based on the returns to agriculture from changes in prices and quantities. Those returns are not going to all farmers, but probably those that own land.

Source: USDA, Economic Research Service calculations using the GTAP-AEZ model and USDA, ERS's International Food Security Assessment Model.

Nota: Los autores han modelizado los impactos en tres escenarios de cumplimiento de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad. Un escenario en que los objetivos se adoptasen únicamente en el ámbito europeo, un segundo escenario en el que, tal y como persigue la Estrategia Farm to Fork los objetivos fueran adoptados también por terceros países (en buena medida gracias a la inclusión de requisitos en los acuerdos comerciales) y un tercer escenario en que los objetivos fuesen adoptados a escala mundial. Los autores segregan los impactos a escala europea, estadounidense y mundial.

Fuente: Economic and Food Security Impacts of Agricultural Input Reduction Under the European Union Green Deal's Farm to Fork and Biodiversity Strategies. Beckman, L., et al, USDA, 2021.

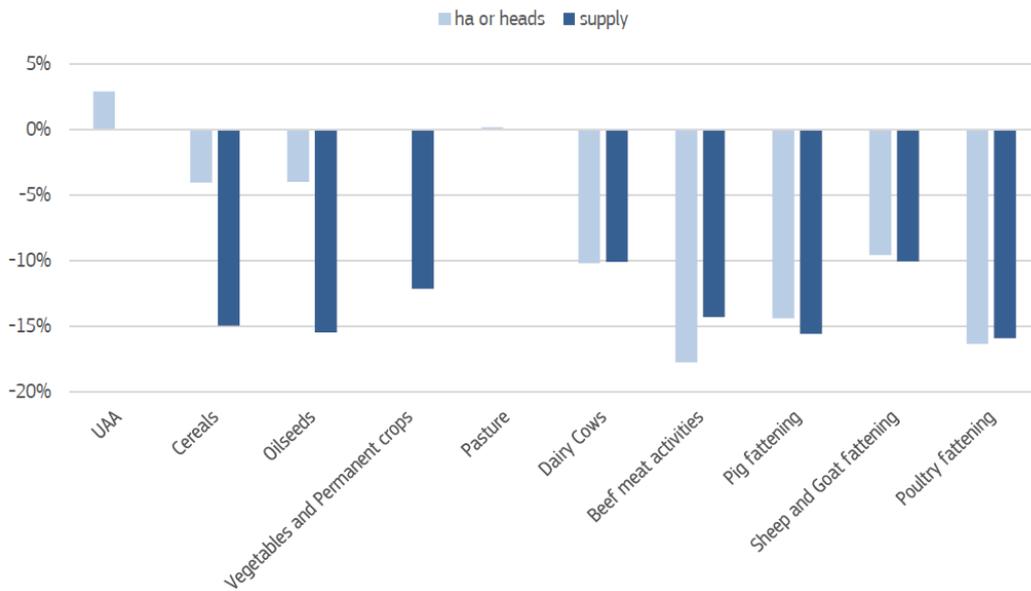
- *Ökonomische und Ökologische Auswirkungen des Green Deals in der Agrarwirtschaft, 2021.*
- *The Socio-Economic and Environmental Values of Plant Breeding in the EU and for Selected EU Member States, 2021.*
- *The EU's farm-to-fork strategy: An assessment from the perspective of agricultural economics. Wesseler, J. 2022.*

Figura 42. Cambios en la producción (% de variación) asociados a la consecución de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de biodiversidad (escenario en que estas políticas se aplicasen únicamente en la UE).

	EU
Rice	-13.2
Wheat	-48.5
Coarse grains	-20
Fruits and vegetables	-5.2
Nuts	-9.2
Oil seeds	-60.7
Sugar crops	-20.5
Other crops	-44
Cattle	-14.8
Hogs	-8.4
Other animals	-18.9
Milk	-11.6
Forestry	5.6
Energy, mining	1.1
Beef	-13.5
Pork	-6.9
Other meat	-12.5
Vegetable oil	-16.2
Milk products	-10.6
Processed rice	-4.3
Sugar	-16.3
Processed food	-4.5
Labor intensive manufactures	3
Other chemicals	1.3
Fertilizers	-5.9
Pesticides	-16.1
Capital intensive manufacturing	1.7
Services	0.2

Fuente: *Economic and Food Security Impacts of Agricultural Input Reduction Under the European Union Green Deal's Farm to Fork and Biodiversity Strategies*. Beckman, L., et al, USDA, 2021.

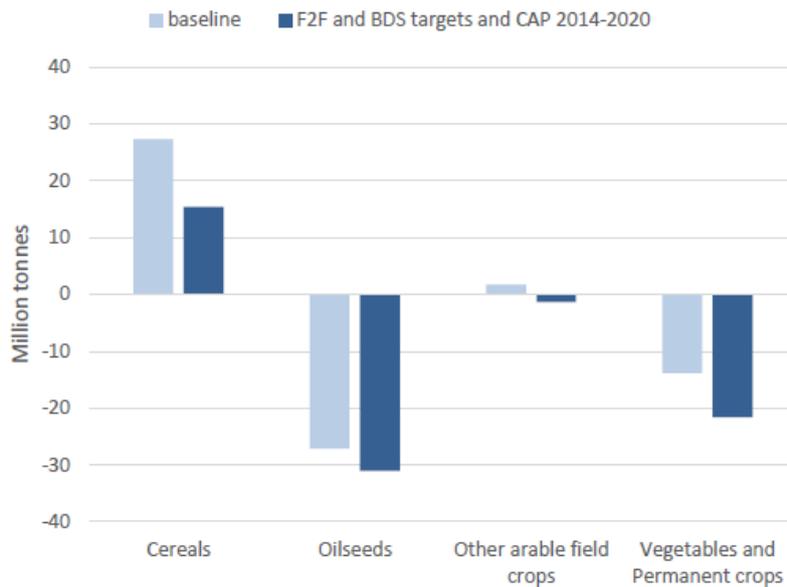
Figura 43. Variaciones en la superficie cultivada en la UE 27 (ha) o número de cabezas de ganado en 2030 respecto al escenario base 2014-2020, en caso de alcanzarse los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad.



Fuente: Modelling environmental and climate ambition in the agricultural sector with the CAPRI MODEL. Exploring the potential effects of selected Farm to Fork and Biodiversity strategies targets in the framework of the 2030 Climate targets and the post 2020 Common Agricultural Policy. Barreiro-Hurle et al., JRC., 2021.

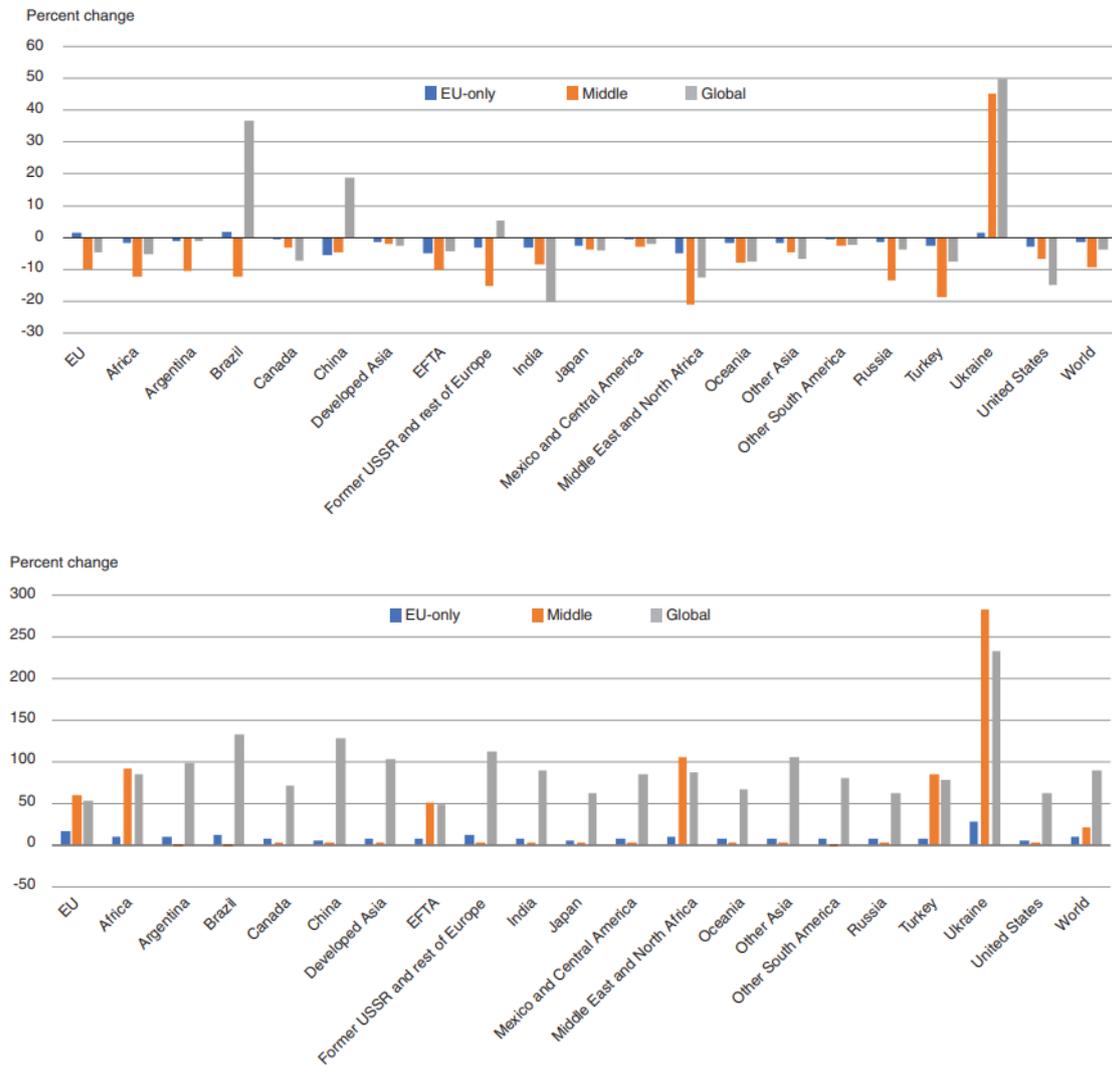
La reducción de la producción europea de alimentos ocasionada por la reducción de rendimientos y los cambios en las superficies cultivadas, supondrán cambios en las balanzas comerciales de la UE, reduciéndose el volumen de exportaciones de aquellos productos en los que actualmente la UE es excedentaria e incrementándose las importaciones de aquellos productos en los que ya, hoy en día se es deficitario.

Figura 44. Balanza comercial neta de la UE para distintos productos vegetales en la situación actual y en el escenario 2030 en caso de alcanzarse los objetivos previstos en las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad de la UE



Fuente: Modelling environmental and climate ambition in the agricultural sector with the CAPRI MODEL. Exploring the potential effects of selected Farm to Fork and Biodiversity strategies targets in the framework of the 2030 Climate targets and the post 2020 Common Agricultural Policy. Barreiro-Hurle et al., JRC., 2021.

Figura 45. Cambios en la importación (arriba) y exportación (abajo) de alimentos en diferentes zonas del mundo en función de los tres escenarios de implantación de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad (únicamente en la UE, en la UE y otros países del mundo y a nivel global).



Nota: Los autores han modelizado los impactos en tres escenarios de cumplimiento de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad. Un escenario en que los objetivos se adoptasen únicamente en el ámbito europeo, un segundo escenario en el que, tal y como persigue la Estrategia Farm to Fork los objetivos fueran adoptados también por terceros países (en buena medida gracias a la inclusión de requisitos en los acuerdos comerciales) y un tercer escenario en que los objetivos fuesen adoptados a escala mundial. Los autores segregan los impactos a escala europea, estadounidense y mundial.

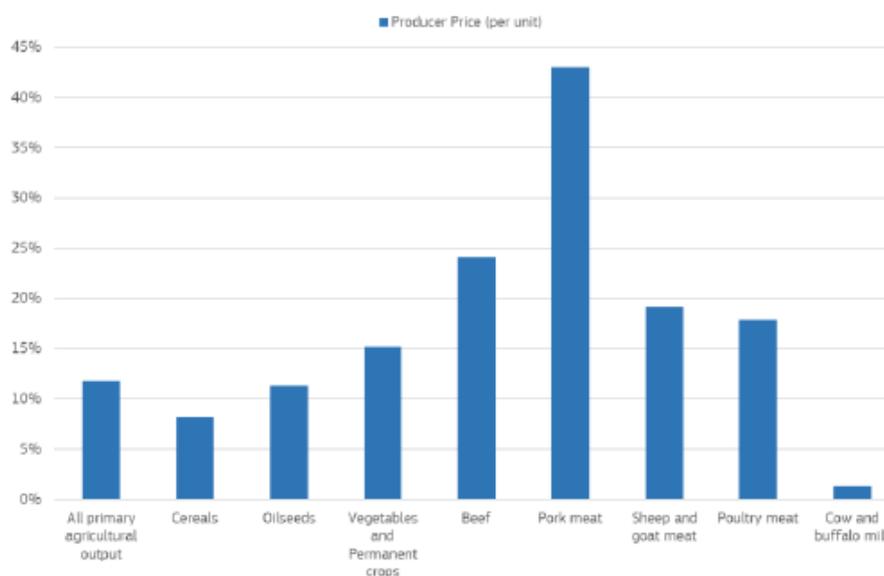
Fuente: Economic and Food Security Impacts of Agricultural Input Reduction Under the European Union Green Deal's Farm to Fork and Biodiversity Strategies. Beckman, L., et al, USDA, 2021.

Como consecuencia del decremento de la producción, a no ser que se tomen medidas adicionales, se prevé que se produzca un incremento de los precios de producción de los agricultores, que se acabará traduciendo en una reducción de ingresos para los mismos y en un incremento de precio de los consumidores (en caso de implantarse

Como consecuencia del decremento de la producción, se prevé que se produzca un aumento de los costes de los agricultores, que se acabará traduciendo en una reducción de ingresos para los mismos y en un incremento de precios para los consumidores.

las políticas de las estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad en la UE, se prevé un incremento de coste para las familias de 152 dólares anuales per cápita)²⁵.

Figura 46. Cambios en la UE-27 de los precios para los productores para los principales cultivos y actividades ganaderas como consecuencia de la implantación de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad (año 2030 comparado con el periodo 2014-2020).



Fuente: Modelling environmental and climate ambition in the agricultural sector with the CAPRI MODEL. Exploring the potential effects of selected Farm to Fork and Biodiversity strategies targets in the framework of the 2030 Climate targets and the post 2020 Common Agricultural Policy. Barreiro-Hurle et al., JRC., 2021.

Figura 47. Variación (%) de los ingresos de los agricultores como consecuencia de la implantación de las Estrategias Farm To Fork y de Biodiversidad

	EU-only	Middle	Global
EU	-16.4	7.5	14.6
Africa	3.7	11.3	16.6
Argentina	5.9	-4.7	16.9
Brazil	3.4	-2.3	-5.1
Canada	4.1	1.0	25.0
China	1.0	0.9	-4.6
Developed Asia	9.0	1.9	66.5
EFTA	25.8	131.5	111.9
Former USSR and rest of Europe	6.0	3.5	15.9
India	5.3	0.1	48.2
Japan	1.5	1.3	9.6
Mexico and Central America	6.9	0.1	18.8
Middle East and North Africa	2.6	3.7	4.4
Oceania	5.9	-0.1	27.7
Other Asia	6.7	0.1	35.8
Other South America	4.9	-2.1	15.8
Russia	7.9	-3.4	27.6
Turkey	3.7	16.9	18.1
Ukraine	8.8	14.0	6.1
United States	6.2	0.5	34.2
World	2.0	3.6	17.1

Nota: Los autores han modelizado los impactos en tres escenarios de cumplimiento de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad. Un escenario en que los objetivos se adoptasen únicamente en el ámbito europeo, un segundo escenario en el que, tal y como persigue la Estrategia Farm to Fork los objetivos fueran adoptados también por terceros países (en buena medida

²⁵ Un incremento que se sumaría al aumento de precios derivada de la evolución de la inflación en el último año. Así, tan sólo en 2022, el incremento del coste de la cesta de la compra de los españoles fue de un 9,1%. Fuente: Tendencias del Consumidor 2022, NielsenIQ, 2023.

gracias a la inclusión de requisitos en los acuerdos comerciales) y un tercer escenario en que los objetivos fuesen adoptados a escala mundial. Los autores segregan los impactos a escala europea, estadounidense y mundial.

Fuente: *Economic and Food Security Impacts of Agricultural Input Reduction Under the European Union Green Deal's Farm to Fork and Biodiversity Strategies*. Beckman, L., et al, USDA, 2021.

Figura 48. Cambios en el gasto en alimentación anual per cápita derivados de la implantación de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad (dólares adicionales de gasto)

	EU Only	Middle	Global
EU	153.2	650.5	601.9
Africa	47.0	412.8	381.7
Argentina	56.0	-14.6	501.3
Brazil	76.0	-7.2	665.0
Canada	86.4	24.0	709.7
China	32.5	6.9	542.0
Developed Asia	78.8	23.5	919.2
European Free Trade Association	131.2	680.3	648.0
Former USSR and rest of Europe	82.5	26.7	660.0
India	19.6	1.2	213.7
Japan	56.0	19.1	767.4
Mexico and Central America	58.3	4.4	546.4
Middle East and North Africa	70.8	673.7	539.6
Oceania	71.8	11.0	484.7
Other Asia	32.0	2.0	341.3
Other South America	61.2	-3.0	582.5
Russia	69.4	13.2	527.4
Turkey	75.9	777.5	704.6
Ukraine	109.6	934.1	760.5
United States	58.6	16.2	512.2
World	50.6	159.3	450.1

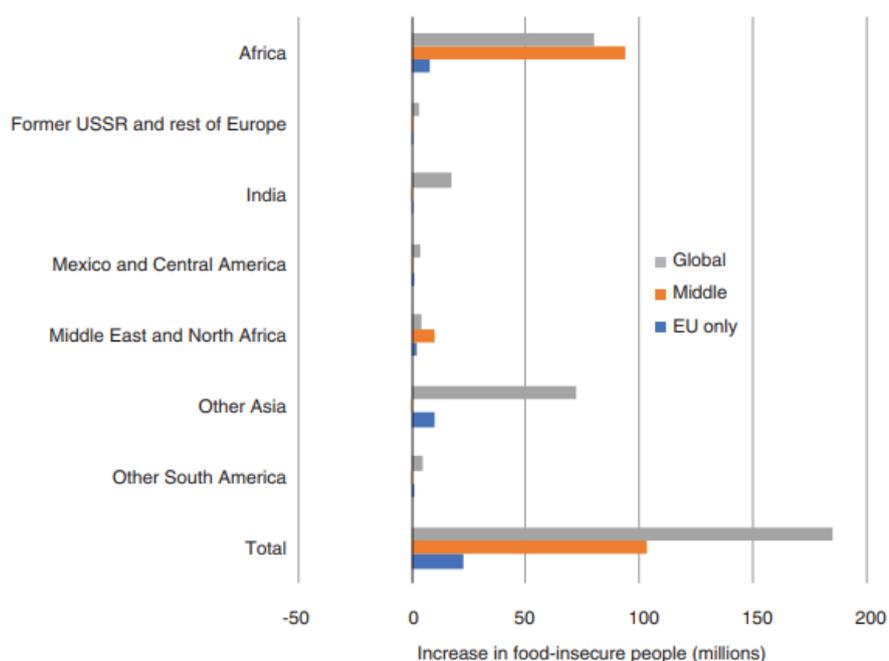
Nota: Los autores han modelado los impactos en tres escenarios de cumplimiento de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad. Un escenario en que los objetivos se adoptasen únicamente en el ámbito europeo, un segundo escenario en el que, tal y como persigue la Estrategia Farm to Fork los objetivos fueran adoptados también por terceros países (en buena medida gracias a la inclusión de requisitos en los acuerdos comerciales) y un tercer escenario en que los objetivos fuesen adoptados a escala mundial. Los autores segregan los impactos a escala europea, estadounidense y mundial.

Fuente: *Economic and Food Security Impacts of Agricultural Input Reduction Under the European Union Green Deal's Farm to Fork and Biodiversity Strategies*. Beckman, L., et al, USDA, 2021.

En este contexto, cabe destacar, como impacto de mayor relevancia, que, en caso de no tomarse medidas adicionales, la implementación de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad acabarían derivando en un incremento de la población en situación de inseguridad alimentaria a escala mundial, al reducirse la producción del continente europeo. Si bien el impacto a escala de la UE sería mínimo, el incremento de la población mundial en situación de inseguridad sería superior a los 20 millones de personas, en el escenario que las políticas únicamente se implantasen a escala de la UE (si los principios de la estrategia Farm to Fork se exportasen a otras zonas del planeta, el impacto sería superior).

En caso de no tomarse medidas adicionales, la implementación de las Estrategias F2F y de Biodiversidad, acabarían produciendo un incremento en 20 millones de personas de la población en situación de inseguridad alimentaria a nivel mundial

Figura 49. Incremento neto de la población en situación de inseguridad alimentaria derivado de los tres escenarios de implementación de las políticas de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad



Nota: Los autores han modelizado los impactos en tres escenarios de cumplimiento de los objetivos de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad. Un escenario en que los objetivos se adoptasen únicamente en el ámbito europeo, un segundo escenario en el que, tal y como persigue la Estrategia Farm to Fork los objetivos fueran adoptados también por terceros países (en buena medida gracias a la inclusión de requisitos en los acuerdos comerciales) y un tercer escenario en que los objetivos fuesen adoptados a escala mundial. Los autores segregan los impactos a escala europea, estadounidense y mundial.

Fuente: Economic and Food Security Impacts of Agricultural Input Reduction Under the European Union Green Deal's Farm to Fork and Biodiversity Strategies. Beckman, L., et al, USDA, 2021.

e. El incremento de coste de los insumos agrarios

Como se ha indicado con anterioridad, la evolución de la agricultura en los últimos dos siglos ha estado ligada a una intensificación en el uso de recursos naturales en la misma. En este sentido, si bien los precios de algunos de los insumos agrícolas se ven fuertemente influenciados por aspectos de carácter coyuntural (aspectos geopolíticos, episodios de especulación, etc.) es previsible que el precio de los mismos siga una tendencia creciente en las próximas décadas, como consecuencia del incremento poblacional a escala mundial y de la intensificación agrícola de otras partes del mundo. En este sentido:

- Se prevé un incremento de la demanda de productos como fertilizantes de carácter mineral y otros agroquímicos que, asociado a basarse su producción en recursos de carácter no renovable o con una elevada intensidad energética²⁶, hará que progresivamente el precio de estos elementos se

La agricultura también se enfrenta a la necesidad de reducir los inputs de los cultivos por motivos de carácter económico, asociados al progresivo incremento del coste de las materias primas empleadas.

²⁶ La producción de fertilizantes es uno de los principales factores de consumo de energía de la producción agraria. Así por ejemplo, en Estados Unidos, del consumo de combustibles fósiles asociado a la producción agraria, un 31% se emplea para la fabricación de fertilizantes orgánicos, un 19% para el funcionamiento de la maquinaria agrícola, un 16% para el transporte, un 13% para riego, un

incremente. En este contexto, cabe destacar que la UE depende de fuentes externas para la mayoría de los fertilizantes que consume: nitrógeno inorgánico (un 30%), fosfato (un 68%) y potasio (un 85%)

- Es previsible que se produzca el incremento del precio de otros recursos como el agua para usos agrícolas, al tratarse de un recurso que, pese a ser renovable, es limitado, y cuya disponibilidad se prevé se vea reducida en las próximas décadas.

Así, de forma adicional a las motivaciones ambientales, la agricultura también se enfrenta a la necesidad de reducir los inputs en los cultivos por motivos de carácter económico, asociados al progresivo incremento del coste de las materias primas empleadas (recursos energéticos, hídricos y minerales).

f. La necesidad de garantizar la sostenibilidad económica de la producción agrícola

Como se ha visto en los puntos anteriores, existen diferentes tendencias que conducen a una reducción de los rendimientos de la actividad agraria (el cambio climático y la necesidad de hacer una transición hacia a sistemas de cultivo sostenibles). Una reducción que podría derivar en una reducción de los ingresos de los agricultores.

En este sentido, resulta necesario adoptar medidas y políticas que garanticen la sostenibilidad económica del campo europeo y español, haciendo viable la actividad agrícola ante los retos a los que debe enfrentarse. De lo contrario, se corre el riesgo de perder esta actividad y las externalidades positivas relacionadas con la fijación de la población en el territorio y la gestión que esta población realiza el mismo.

España ha logrado en las últimas décadas situarse como una de las primeras potencias mundiales en la producción de determinados cultivos, como las hortalizas. En este contexto, resulta necesario que las medidas adoptadas para hacer frente al resto de retos vengan acompañadas de instrumentos que permitan garantizar la competitividad de estos cultivos y de las zonas donde se producen, de lo contrario, se podría asistir a la pérdida de estos sectores y, de forma asociada, a dinámicas de despoblación de las zonas productoras, como por ejemplo Huelva y Almería, similares a las observadas en otras zonas del territorio español.

Resulta necesario que las medidas adoptadas para hacer frente al resto de retos vengan acompañadas de instrumentos que permitan garantizar la competitividad de estos cultivos y de las zonas donde se producen, de lo contrario se podría asistir a la pérdida de sectores económicos y de forma asociada, a dinámicas de despoblación de las zonas productoras.

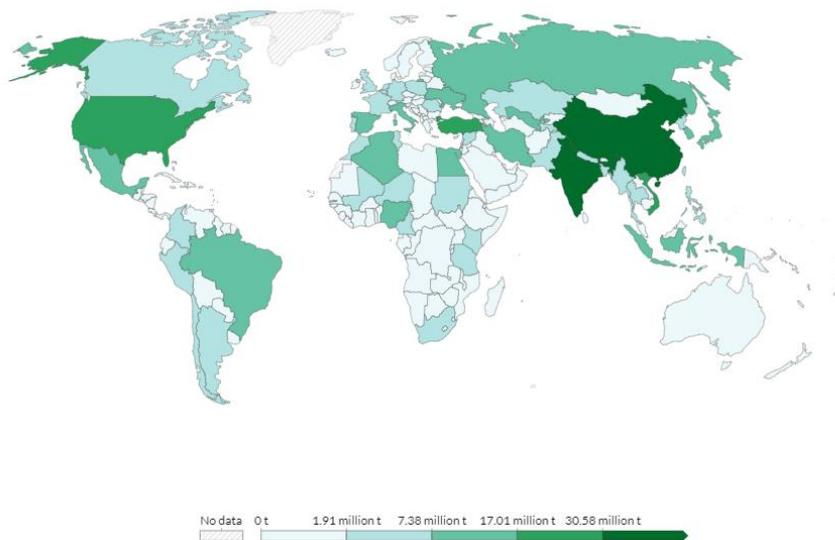
0,8% en la cría de ganado (sin considerar su alimentación), un 0,5% para el secado de los cultivos, un 0,5% para la producción de fitosanitarios, y un 0,8% para otros usos.

El papel de España en el mercado único europeo y una agricultura global

El papel de la agricultura en **España a nivel global destaca por ser el mayor exportador mundial de aceite de oliva virgen extra** (con un 42,6% de las exportaciones mundiales), **productos cítricos** (24,6% de las exportaciones mundiales) **y de carne de cerdo** (17,5% de las exportaciones mundiales) en 2021²².

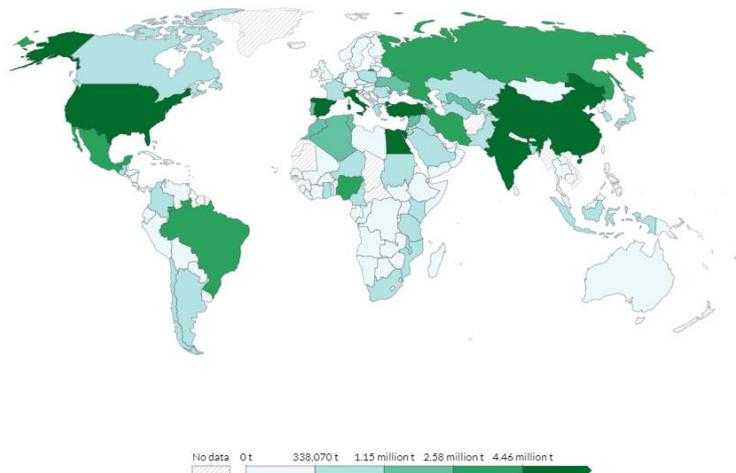
En este contexto, España, y especialmente el sur del país, se ha desarrollado y posicionado como la **“huerta” de Europa, siendo el principal productor de la UE de frutas y hortalizas, con más del 26% de la producción europea, y el séptimo a nivel mundial**²³.

Figura 50. Producción mundial de hortalizas por países en 2021



Fuente: OurWorldinData VisualCapitalist, a partir de datos de base de la FAO, 2021.

Figura 51. Producción mundial de tomate por países en 2021



Fuente: OurWorldinData VisualCapitalist, a partir de datos de base de la FAO, 2021.

²⁷ Observatory of Economic Complexity, 2023.

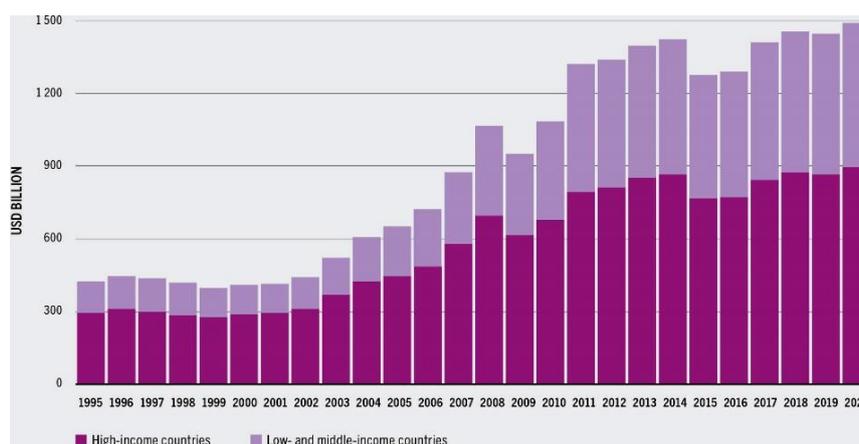
²⁸ Frutas y hortalizas, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2023.

2.2. Retos coyunturales: un mundo con crisis episódicas, continuadas y superpuestas

En un mundo cada vez más conectado y globalizado, la agricultura no es ajena a las fluctuaciones e incertidumbres del mercado internacional. La volatilidad de los precios y la demanda, así como la competencia global, son factores que afectan a los productores y al sector en su conjunto. En este contexto, la agroalimentación se enfrenta a desafíos significativos para mantener su rentabilidad y sostenibilidad, mientras se adapta a las exigencias y riesgos de un mercado globalizado.

La agricultura (y la alimentación en general) se ha globalizado a través de una serie de procesos económicos, tecnológicos y políticos que han transformado la producción y el comercio de alimentos en todo el mundo. En las últimas décadas, la liberalización del comercio internacional, la aplicación de tecnologías avanzadas y la creciente demanda de alimentos en países en desarrollo han llevado a la intensificación y la especialización de la producción agrícola en muchas partes del mundo. Esto ha permitido la expansión de las cadenas de suministro alimentario a nivel mundial y la integración de las economías agrícolas nacionales en una red global de producción y comercio de alimentos, tal y como puede verse en la evolución de las exportaciones agrícolas a nivel global en las últimas décadas²⁹.

Figura 52. Valor (en miles de millones de dólares) de las exportaciones agrícolas a nivel global



Fuente: FAO, 2022.

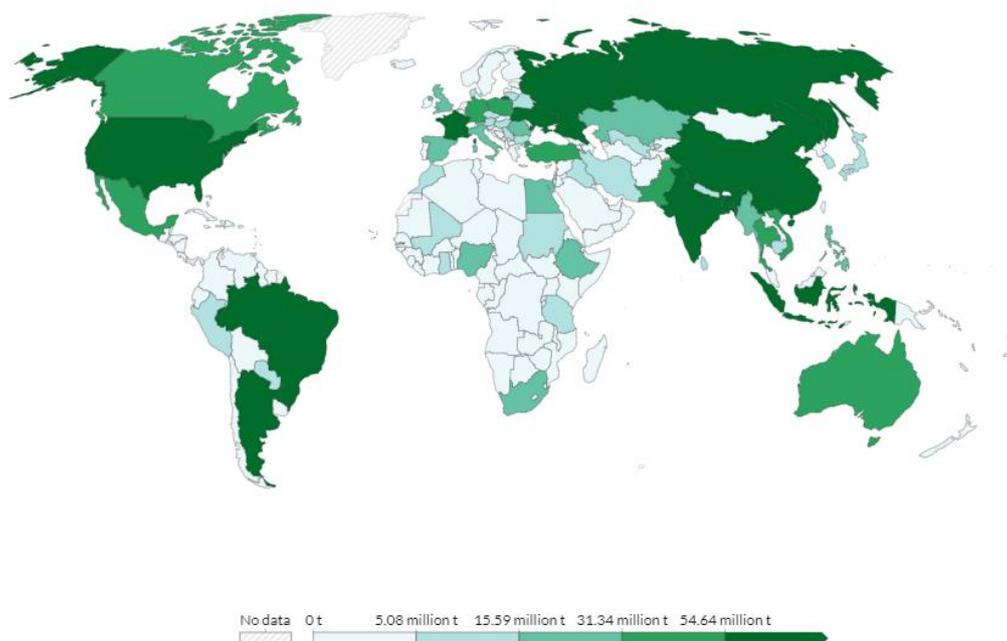
La globalización de la agricultura ha generado grandes oportunidades para la economía y seguridad alimentaria global, permitiendo la diversificación en el acceso a productos agrarios, hacer frente a situaciones puntuales de escasez en determinadas zonas geográficas y reducir los costes de los alimentos para los consumidores. A nivel nacional, ha permitido el posicionamiento de España como el líder mundial de la exportación de ciertos productos agroalimentarios, gracias a poder acceder a nuevos mercados, nuevos materiales y tecnologías.

²⁹ The State of Agricultural Commodity Markets 2022: Global and regional trade networks. FAO, 2022..

No obstante, esta interconexión global también hace a la producción agraria susceptible de ser afectada por disrupciones que emergen en el ámbito internacional. En este sentido, como se ha indicado, la globalización ha permitido la especificación y concentración de determinados cultivos a escala mundial, produciéndose problemas cuando una o más de estas zonas del planeta se ven afectadas por crisis (climáticas, geopolíticas, etc.) u otros factores que alteran su producción o distribución de alimentos, dado que esta alteración se acaba transmitiendo a múltiples zonas del planeta.

Pese a sus ventajas, la interconexión global también hace a la producción agraria susceptible de ser afectada por disrupciones que emergen en el ámbito internacional. Produciéndose problemas cuando alguna de las zonas “granero” del mundo se ven afectadas por crisis climáticas, geopolíticas, etc.

Figura 53. Producción mundial de cereales por países en 2021 (trigo, arroz, maíz, cebada, avena, centeno, mijo, sorgo, alforfón y granos mezclados)



Source: UN Food and Agriculture Organization (FAO)
Note: Cereals include wheat, rice, maize, barley, oats, rye, millet, sorghum, buckwheat, and mixed grains.

Fuente: OurWorldinData VisualCapitalist, a partir de datos de base de la FAO, 2021.

Resulta necesario no incrementar los niveles de dependencia del sistema alimentario español, especialmente de algunos productos de carácter básico.

En este sentido, con objeto de incrementar la resiliencia del sistema alimentario español frente a crisis episódicas en el suministro de alimentos a nivel mundial, resulta necesario asegurar que no se incrementen los niveles de dependencia del sistema alimentario español respecto a las importaciones, especialmente de algunos productos de carácter básico para la alimentación de la sociedad española. Entre las medidas que se pueden desarrollar se

encuentra el incremento del rendimiento de los cultivos, y el desarrollo de medidas para asegurar que no disminuya la superficie cultivada de determinados cultivos de carácter básico.

Ejemplo: el déficit español de cereales

El sector agrario español es deficitario en la producción de cereales. Según el MAPA, el déficit comercial en cereales (es decir, las exportaciones menos las importaciones) ascendió a 13.600 millones de toneladas en la campaña 2021-2022, y el grado de autosuficiencia (ratio entre la producción y el consumo nacional) fue del 64%, inferior al 68% de la campaña anterior. Entre los cereales, destaca la elevada dependencia externa del maíz (con un déficit comercial de 8.280 toneladas y un grado de autosuficiencia del 34%), un cereal que se usa en su mayor parte para la alimentación animal (81,2%). Además, gran parte de las importaciones provinieron de Ucrania, país del cual procedió el 30% del maíz importado por España en 2020.

Balance del mercado de cereales en España

Campaña 2021-2022, unidades en miles de toneladas. Datos a julio de 2022

	Trigo blando	Trigo duro	Cebada	Maíz	Centeno	Avena	Sorgo	Triticale	TOTAL CEREALES
Superficie (1.000 ha)	1.854	258	2.528	358	118	507	5	267	5.894
Rendimiento (t/ha)	4,1	2,9	3,6	12,3	2,6	2,4	3,8	2,9	4,1
Producción	7.560	744	8.982	4.415	302	1.198	19	784	24.004
Existencias iniciales	777	81	707	1.214	44	33	27	72	2.954
Importaciones	4.600	300	620	8.500	320	110	120	160	14.730
TOTAL DISPONIBLE	12.937	1.124	10.309	14.129	665	1.342	166	1.015	41.688
Consumo interno	11.864	700	9.346	12.812	631	1.264	141	975	37.732
Alimentación animal	7.200	40	8.100	10.400	550	1.150	140	930	28.510
Semillas	405	56	455	19	17	69	0	42	1.064
Alimentación humana	4.200	600	10	100	60	35	-	-	5.005
Usos industriales	20	-	750	2.250	2	6	-	-	3.028
Pérdidas	39	4	31	42	2	4	1	3	125
Exportaciones	300	350	200	220	-	50	4	8	1.132
TOTAL UTILIZADO	12.164	1.050	9.546	13.032	631	1.314	145	983	38.864
Existencias finales	773	74	763	1.097	34	28	22	32	2.823
Balance comercial (exp.-imp.)	-4.300	50	-420	-8.280	-320	-60	-116	-152	-13.598
Grado de autosuficiencia ¹	64%	106%	96%	34%	48%	95%	13%	80%	64%
Dependencia de las importaciones ²	39%	43%	7%	66%	51%	9%	85%	16%	39%

Balance del mercado de semillas oleaginosas en España

Campaña 2021-2022, unidades en miles de toneladas. Datos a julio de 2022

	Colza	Soja	Girasol	TOTAL OLEAGINOSAS
Superficie (1.000 ha)	83	2	626	711
Rendimiento (t/ha)	2,6	3,0	1,2	4,1
Producción	217	5	767	989
Existencias iniciales	6	150	30	186
Importaciones	90	3.500	360	3.950
TOTAL DISPONIBLE	313	3.655	1.157	5.125
Consumo interno	196	3.524	1.105	4.825
Exportaciones	112	11	22	145
TOTAL UTILIZADO	308	3.535	1.127	4.970
Existencias finales	5	120	30	155
Balance comercial (exp.-imp.)	22	-3.489	-338	-3.805
Grado de autosuficiencia ¹	111%	0%	69%	20%
Dependencia de las importaciones ²	46%	99%	33%	82%

Notas: (1) Grado de autosuficiencia = producción/consumo interno.
(2) Dependencia de las importaciones = importaciones/consumo interno.

Fuente: CaixaBank Research, a partir de datos del MAPA.

Fuente: El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales. Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

En los últimos años el mundo ha vivido crisis de múltiples naturalezas: ambientales, de salud, geopolíticas. La inestabilidad actual muestra que **estas crisis ya no son hechos aislados, sino que pueden formar parte de una nueva normalidad en el mundo y que pueden tener una especial incidencia en las cadenas agroalimentarias a escala mundial.**

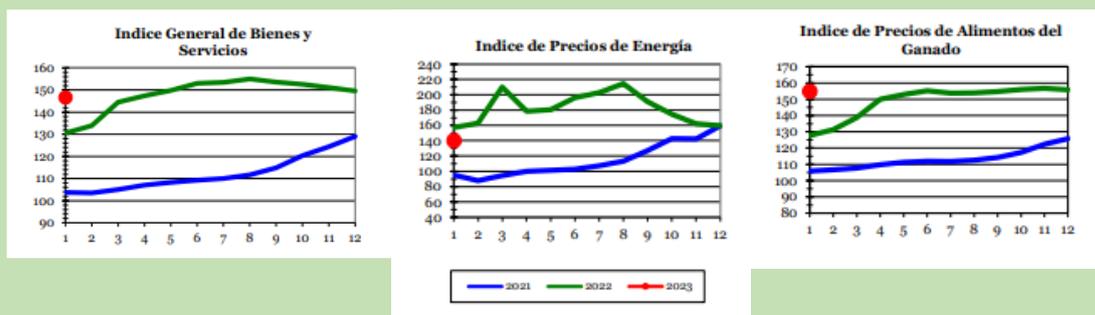
A continuación, se muestran, a modo ejemplo, la incidencia que dos de las últimas crisis (el COVID-19 y la guerra de Ucrania) han tenido sobre la seguridad alimentaria a nivel mundial y su efecto a escala española, con un incremento continuado de los precios de los inputs agrarios y la elevada inflación derivada sobre el precio de los alimentos.

El impacto de las recientes crisis mundiales en España

Las crisis globales de los últimos años han tenido consecuencias en el sistema agroalimentario español, impactando de inicio a fin las cadenas agroalimentarias, aunque sin llegar a un colapso gracias a su resiliencia.

En el inicio de la cadena de suministro, los productores han vivido aumentos de precio sin precedentes de tres de los pilares de las explotaciones agrícolas: la energía, el combustible y los fertilizantes. Este incremento de precios se inició en 2021 (Figura 54), debido a las nuevas tarifas energéticas impulsadas desde la UE, que provocó protestas por parte de los agricultores, y se siguió disparando en 2022 tras el inicio de la invasión de Ucrania.

Figura 54. Precios pagados por los agricultores en 2021, 2022 y 2023.



Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España, 2023.

*Cabe destacar el impacto que ha tenido este último acontecimiento en el precio de los fertilizantes en España. Debido al aumento generalizado del precio de éstos y a la reducción de su accesibilidad y disponibilidad, **los agricultores han visto subidas de hasta un 300% en sus precios.** Teniendo en cuenta que, actualmente, la mitad de los fertilizantes usados en el campo deben ser importados, eso provoca que el sistema agrario español sea muy vulnerable a problemas de suministro y subidas de precio a nivel internacional.*

*En segundo lugar, las recientes crisis también han tenido un gran **impacto en la importación de materias primas.** España es deficitaria en cultivos como el trigo o la soja, productos clave para dos industrias estratégicas españolas: la harinera y panadera, y la industria de piensos. La dependencia exterior en estos casos también sitúa a España en una posición vulnerable frente a problemáticas internacionales de suministro.*

*Estos acontecimientos amenazan tanto a la industria agroalimentaria como a la seguridad alimentaria en Europa y España. En este contexto, en marzo de 2023, **el banco de España alertó sobre un aumento previsto del 12,2% en los precios de los alimentos en España para todo el año.** Esta situación plantea preocupaciones en términos de acceso a alimentos asequibles, la capacidad de los consumidores para satisfacer sus necesidades nutricionales y la estabilidad económica del sector agroalimentario.*

a. Ejemplo: Crisis sanitaria de la COVID-19

Las medidas de confinamiento durante la pandemia por Covid-19 impactaron con fuerza de principio a fin a las cadenas de suministro de alimentos en todo el mundo: falta de personal para las cosechas, cadenas logísticas interrumpidas por interrupciones en el transporte internacional, plantas de procesamiento a menor capacidad y supermercados con falta de personal. La combinación entre la reducción de producción y el constante incremento de la demanda de alimentos desembocó en un aumento del precio de los alimentos con repercusiones globales en 2020 y 2021, afectando no solo a países importadores de alimentos, que suelen ser más vulnerables a crisis internacionales, sino también causando estragos en países exportadores^{30,31,32}.

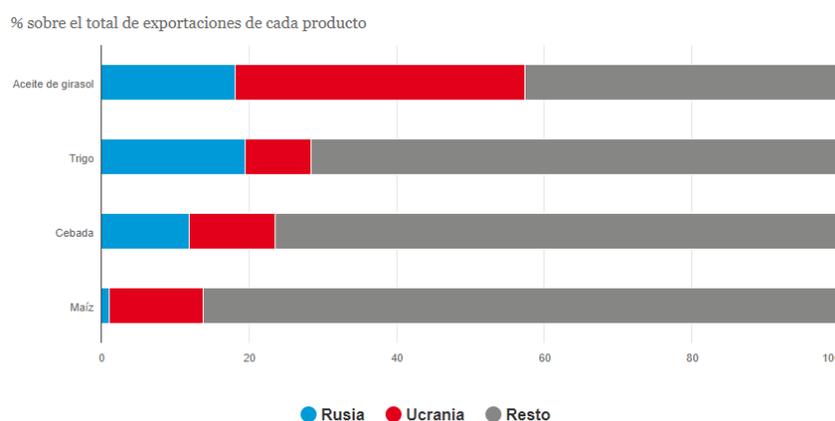
En este sentido, se estima que la pandemia dejó a más de 200 millones de personas en situación de hambruna a finales de 2020. En paralelo, el Programa Mundial de Alimentos se encontró en algunos países con restricciones a la compra de alimentos que iban destinados a los más necesitados, debido a las incertidumbres del mercado provocadas por el SARS-COVID-2. Estas restricciones comerciales generaron importantes impactos económicos en el Programa Mundial de Alimentos que se tradujeron en menores raciones o cheques alimentarios para los más vulnerables.

Asimismo, el impacto de la crisis por COVID-19 fue más allá de las restricciones por la crisis sanitaria, el desacople entre oferta y demanda existente a nivel mundial fue uno de los motivos que ha ocasionado tensiones en el transporte marítimo en los últimos años y uno de los causantes del incremento de costes de los portes observados, un incremento de costes que también impactó sobre los costes de la cadena agroalimentaria y el precio de los alimentos.

b. La guerra de Ucrania

Ucrania y Rusia son dos de las zonas donde se concentra la producción de algunos de los cultivos de mayor consumo a nivel global. Por lo que cualquier crisis que afecte a estas zonas acaba teniendo repercusiones sobre la cadena alimentaria a escala planetaria.

Figura 55. Cuota de las exportaciones mundiales de cereales y aceites (2020)



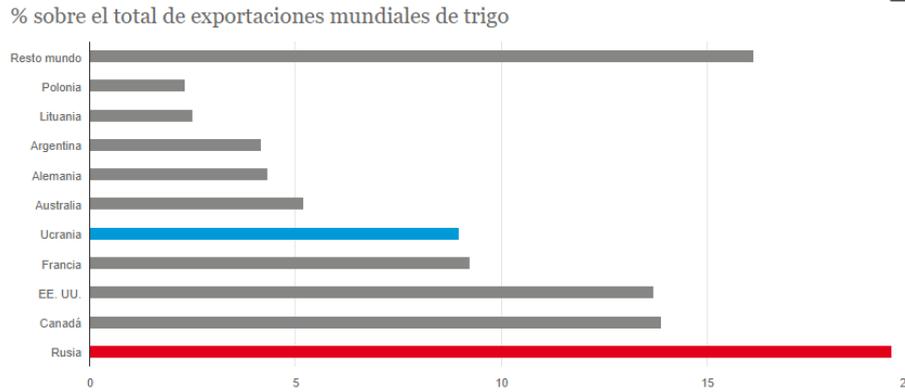
Fuente: *El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales*. Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

³⁰Retail prices of nutritious food rose more in countries with higher COVID-19 case counts. Bai, Y., et al., 2022;

³¹IFPRI Blog: COVID-19 and rising global food prices: What's really happening? Vos, B. et al., 2022.

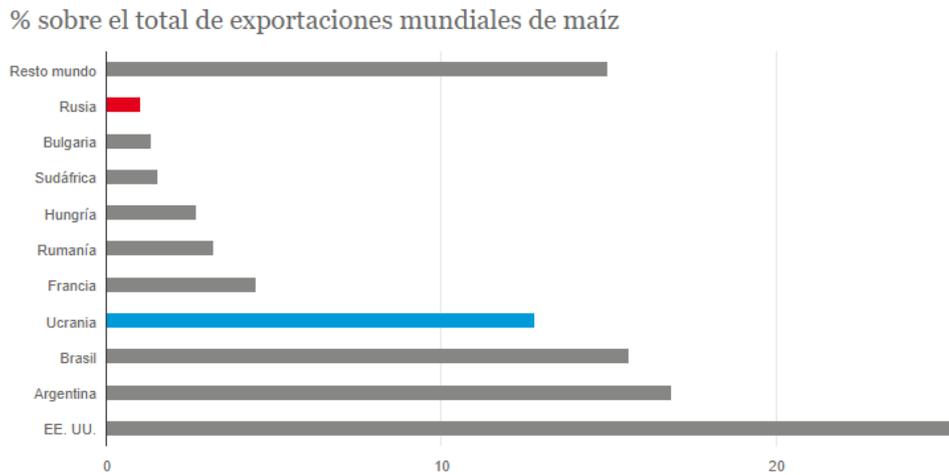
³²A reflection on global food security challenges amid the war in Ukraine and the early impact of climate change. Aminetzah, D. et al., 2022.

Figura 56. 10 principales países exportadores de trigo a nivel mundial



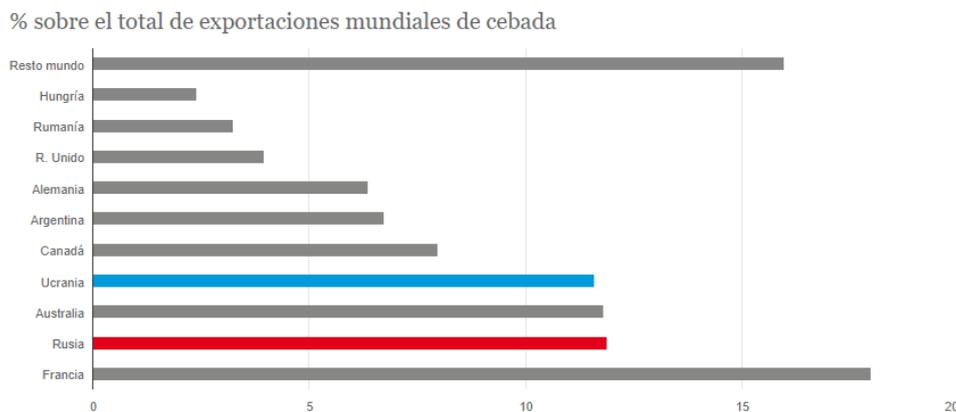
Fuente: El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales. Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

Figura 57. 10 principales países exportadores de maíz a nivel mundial



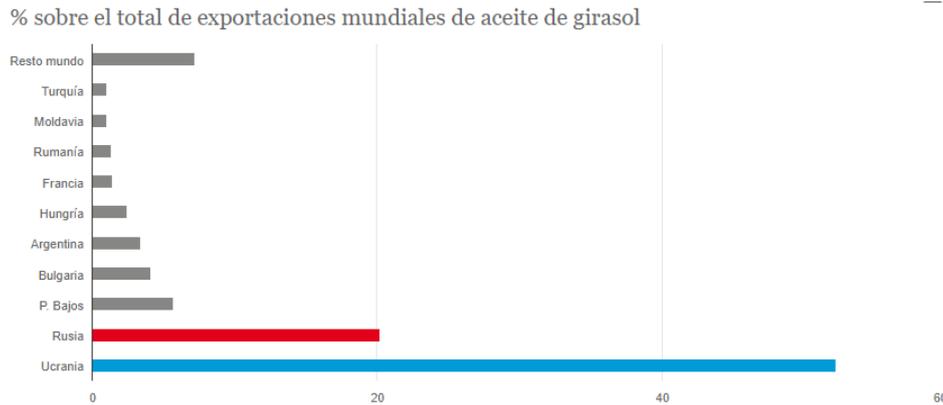
Fuente: El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales. Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

Figura 58. 10 principales países exportadores de cebada a nivel mundial



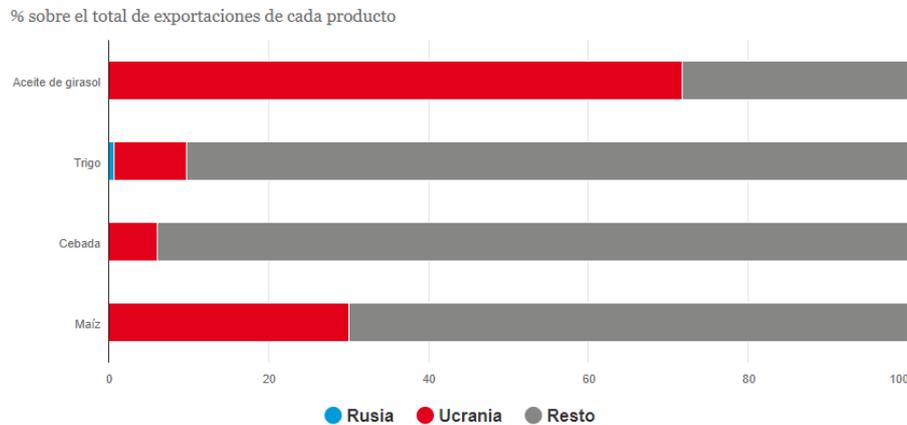
Fuente: El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales. Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

Figura 59. 10 principales países exportadores de aceite de girasol a nivel mundial



Fuente: El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales. Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

Figura 60. Origen de las importaciones españolas de cereales y aceites (2020)



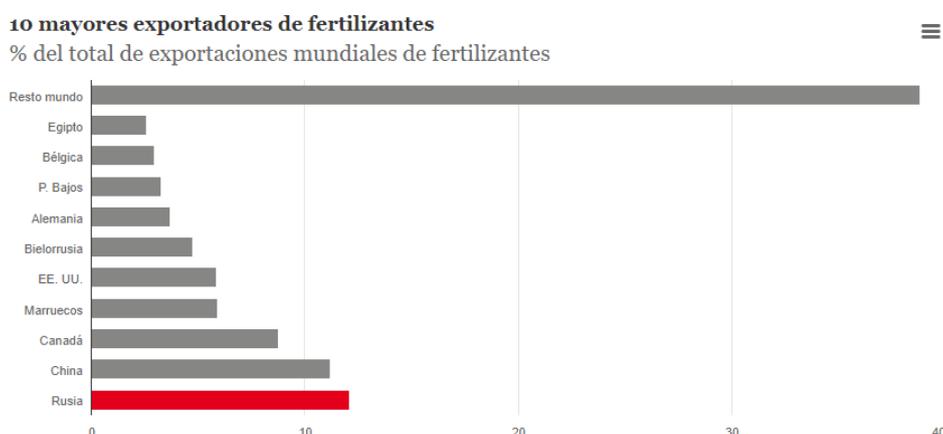
Fuente: El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales. Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

La invasión rusa de Ucrania, iniciada en febrero de 2022, ha supuesto unas consecuencias internacionales para el suministro alimentario sin precedentes. En primer lugar, ambos países suministraban conjuntamente cerca de un 30% del comercio mundial de trigo y un 15% del de maíz, existiendo países enteros dependientes completamente de sus exportaciones, principalmente de África y Oriente Medio. Con el inicio de la invasión, se produjeron diversos bloqueos en el mar negro que impidieron el comercio de trigo, dejando ciertos países enteramente desabastecidos. Asimismo, una menor producción debido al abandono de las tierras de cultivo y las sanciones comerciales impuestas a Rusia, produjeron un desabastecimiento temporal de trigo y el **incremento del precio de este cereal a nivel global**.

Uno de los mayores impactos para el sector agrícola de las recientes disputas geopolíticas es la abrupta subida de precio (e incluso desabastecimiento) de fertilizantes, de los cuales la agricultura mundial es altamente dependiente. Por un lado, China, uno de los mayores exportadores de fertilizantes del mundo, en enero de 2022 empezó a restringir su comercio exterior para asegurar su suministro nacional. Por otro lado, Rusia era el mayor exportador de

fertilizantes del mundo en 2022, representando un 23% de las exportaciones de amoníaco, el 14% de las exportaciones de urea, el 10% de las exportaciones de fosfato procesado y un 21% de las exportaciones de potasio. En este contexto, la disminución de las exportaciones rusas debido a las sanciones y la restricción de la exportación en China, juntamente con los altos precios del combustible y el gas, que suponen un 90% de los costes variables de la producción de fertilizantes, hicieron caer en picado la producción de fertilizantes: en septiembre de 2022 la producción europea había caído un 70% respecto a años anteriores. Estos hechos, de forma conjunta, han provocado un aumento muy pronunciado de su precio, hasta el punto en que la ONU en octubre de 2022 inició presiones para poner barreras a su subida de precio. Por todo ello, la FAO prevé escasez de fertilizantes de cara a finales de 2022 y a lo largo de 2023, lo que tendrá una implicación directa en la productividad agrícola.

Figura 61. Principales exportadores mundiales de fertilizantes



Fuente: El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales. Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

Figura 62. Balance del mercado de fertilizantes en España

Datos de 2020, unidades en miles de toneladas

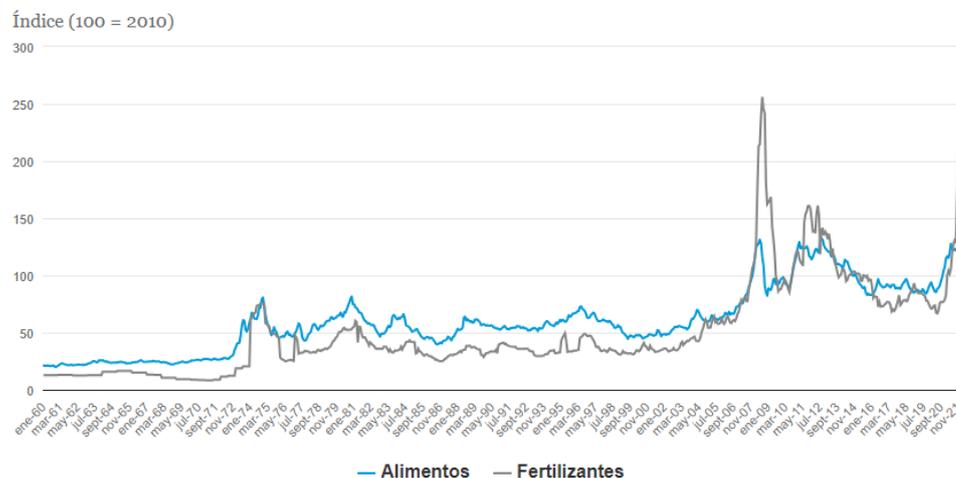
	Nitrogenados simples	Fosfatados simples	Potásicos simples	Complejos	TOTAL FERTILIZANTES
Producción	2.136	212	584	1.327	4.258
Importaciones	1.930	297	314	1.511	4.052
TOTAL DISPONIBLE	4.065	509	898	2.838	8.311
Consumo interno	2.931	313	302	2.212	5.757
Ventas agrícolas	2.495	180	295	2.156	5.126
Usos no agrícolas	436	133	7	56	631
Exportaciones	1.027	122	342	580	2.069
TOTAL UTILIZADO	3.957	434	644	2.791	7.827
Existencias finales	108	75	254	47	484
Balance comercial (exp.-imp.)	-903	-176	28	-932	-1.983
Grado de autosuficiencia ¹	86%	118%	198%	62%	83%
Dependencia de las importaciones ²	77%	165%	106%	70%	79%

Notas: (1) Grado de autosuficiencia = producción/consumo interno.
(2) Dependencia de las importaciones = importaciones/consumo interno.
Fuente: CaixaBank Research, a partir de datos del MAPA.

Fuente: El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales. Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

En este sentido, tanto por la reducción de la producción en Ucrania, como por las restricciones al comercio alimentario desde ambos países, al acceso a fertilizantes procedentes de Rusia y al incremento de los precios de la energía (Rusia era el principal proveedor europeo de gas natural a la UE, siendo también importante su peso en otros combustibles fósiles), **como consecuencia de la guerra se ha observado un incremento continuado de los precios de los alimentos.**

Figura 63. Repunte de los precios internacionales de alimentos y fertilizantes tras el inicio de la guerra de Ucrania



Notas: El índice de precios de las materias primas alimentarias incluye cereales (trigo, arroz, maíz y centeno), aceites ve-getales y harinas (aceite de girasol, aceite de coco, aceite de soja, harina de soja, etc.) y otros alimentos (azúcar, bananas, carne de buey y de pollo, naranjas). Los fertilizantes incluyen nitrogenados, potásicos y fosfatos.

Fuente: CaixaBank Research, a partir de datos del Banco Mundial (World Bank Commodity Price Data «The Pink Sheet»).

CaixaBank Research

Fuente: *El sector agrario español y su dependencia de los mercados agrícolas internacionales.* Álvarez, P., Montoriol, J., CaixaBank Research, 2022.

Tal y cómo se ha visto, Ucrania y Rusia son dos de las zonas de especialización mundial para la producción de determinados alimentos, una especialización que se había visto alimentada por las tendencias de globalización observadas en las últimas décadas. En este sentido, habrá que ver cómo evoluciona esta tendencia en un mundo futuro con mayores tensiones a nivel geopolítico.

De hecho, la reciente guerra no es la primera crisis que se da en esta zona que acaba teniendo una afectación sobre los sistemas alimentarios a escala mundial. Así, la sequía vivida en 2010 en la zona ya tuvo consecuencias globales.

Efectos de la sequía de 2010 en el Mar Negro

En 2010 se produjo un fenómeno climático extremo en la zona del Mar Negro: la sequía del verano de 2010 en esta región afectó a 13 millones de hectáreas de producción de trigo y maíz, lo que llevó a Rusia a cerrar sus exportaciones hasta el final de año y a que Ucrania perdiese prácticamente esta capacidad exportadora. Esta situación fue uno de los factores que produjeron el incremento de precio de estos cereales en los siguientes años, y uno de los causantes del incremento de la población mundial en situación de vulnerabilidad alimentaria.

Figura 64. Exportación de grano desde Rusia 2008-2011 (millones de toneladas)

2008/2009	2009/2010	2010/2011
22,7	21,5	3,7

3. Herramientas para hacer frente a estos retos

Como se ha visto en los capítulos anteriores, la agricultura debe hacer frente a retos que obligan a incrementar el rendimiento de los cultivos (la necesidad de incrementar la producción de alimentos sin aumentar las tierras de cultivo) y otros desafíos que, a su vez, supondrán, en caso de no desarrollarse medidas adicionales, una reducción de los rendimientos de los diferentes cultivos actualmente existentes (el cambio climático y la necesidad de adoptar sistemas de cultivo más sostenibles con una menor aplicación de inputs a la agricultura).

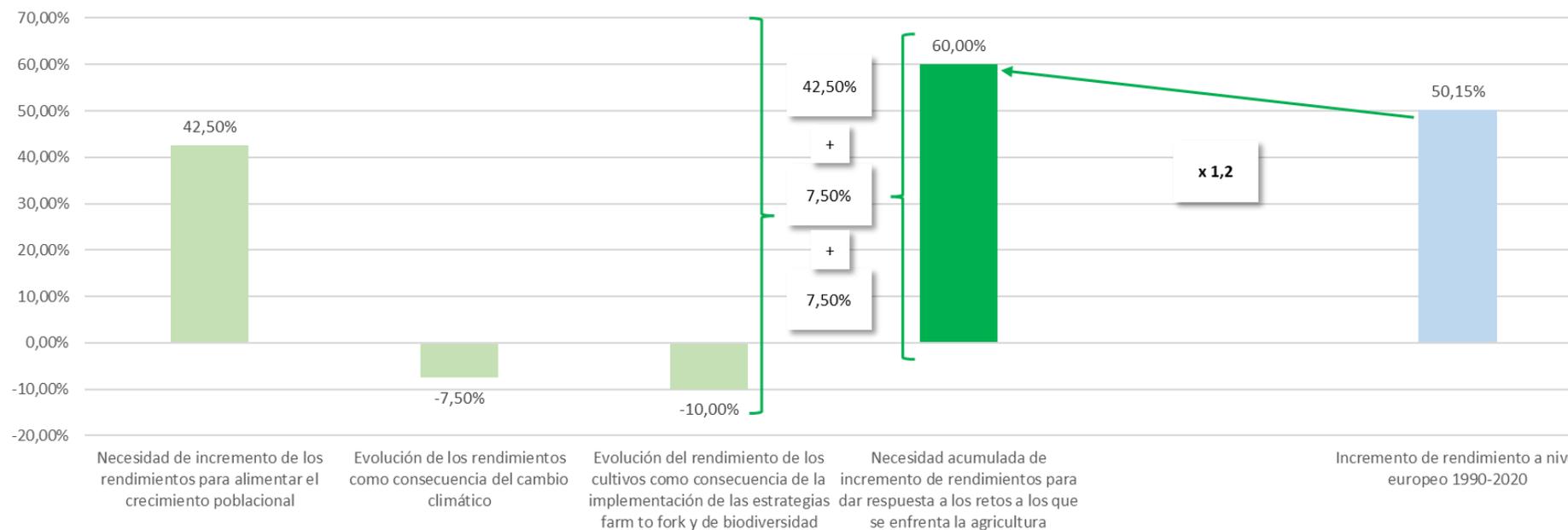
Como consecuencia de la combinación de los diferentes desafíos a los que debe hacer frente la agricultura, se concluye que para el año 2050 será necesario que la innovación permita incrementar el rendimiento de los cultivos a escala europea, en promedio, en un 60% respecto a la situación actual.

Como se puede comprobar en el gráfico de la página siguiente, para lograr alimentar a una población creciente, de forma sostenible, haciendo frente al cambio climático y sin incrementar la superficie agrícola, el ritmo de incremento del rendimiento de los cultivos deberá ser en los próximos 30 años un 20% más acelerado que el observado en los últimos 30 años.

Como consecuencia de la combinación de los diferentes desafíos a los que debe hacer frente la agricultura, en 2050 será necesario incrementar, en promedio y a escala europea, un 60% los rendimientos de los cultivos respecto a la situación actual.

El ritmo de incremento del rendimiento de los cultivos deberá ser en los próximos 30 años un 20% más acelerado que el observado en las tres décadas pasadas.

Figura 65. Necesidad de incremento del rendimiento de los cultivos en la UE entre 2020 y 2050 para hacer frente a los diferentes desafíos a los que se enfrenta la agricultura y comparativa con el incremento de rendimientos observados entre 1990 y 2020



Notas:

- La necesidad de incremento de los cultivos se ha calculado como promedio de las estimaciones de la FAO para 2050 publicadas en 2019. Para más información, consultar el capítulo 2.1.a.
- La evolución de los rendimientos como consecuencia del cambio climático se ha calculado a partir de los datos de base publicados en *Global Vulnerability of crop yields to climate change*. Wing, I. et al, 2021. Para más información consultar el capítulo 2.1.c.
- La evolución del rendimiento de los cultivos como consecuencia de la aplicación de las Estrategias Farm to Fork y de Biodiversidad, se han obtenido como promedio de los datos publicados en *Modelling environmental and climate ambition in the agricultural sector with the CAPRI MODEL. Exploring the potential effects of selected Farm to Fork and Biodiversity strategies targets in the framework of the 2030 Climate targets and the post 2020 Common Agricultural Policy*. Barreiro-Hurle et al., JRC., 2021.
- La necesidad acumulada obedece a la suma de los tres conceptos anteriores.
- El incremento del rendimiento de los cultivos en los últimos 30 años se ha obtenido a partir de la media aritmética del incremento de rendimientos de los cultivos para el trigo, tomate y maíz entre los periodos 1990-1995 y 2016-2021. Empleando como datos de base los publicados por la FAO.

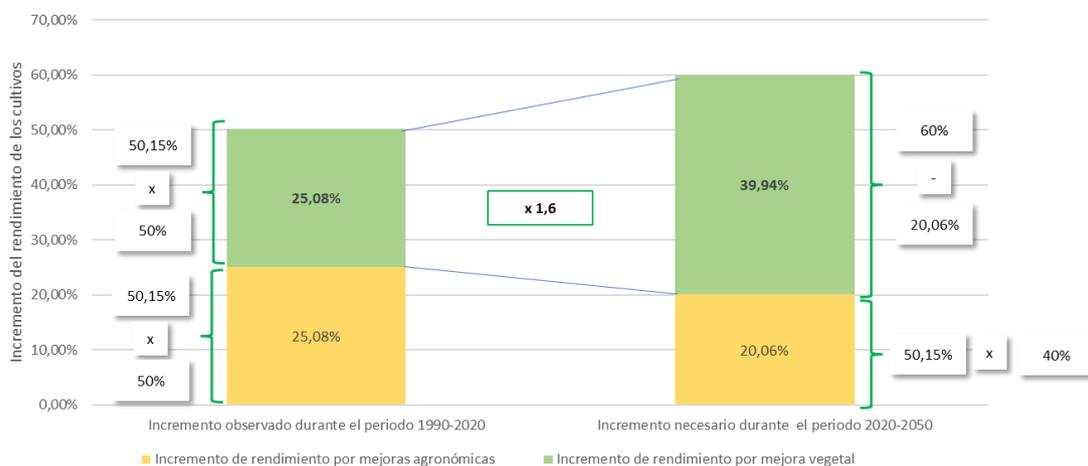
Este reto, ya de por sí de magnitud considerable, tiene como dificultad añadida que no podrá realizarse de la misma manera en que se ha desarrollado el incremento de rendimiento en los últimos decenios. **La mejora de la productividad de los cultivos de las últimas décadas** (un 50,15% de incremento del rendimiento, tal y como se ha reflejado en la gráfica anterior) **ha venido en un 50% por el incremento de inputs y la tecnificación agrícola, y en un 50% por la mejora vegetal**^{33,34}. No obstante, el potencial de incremento de los rendimientos de los cultivos en los próximos años no podrá basarse tanto en la tecnificación agrícola, dada la necesidad de producir más con menos recursos.

El incremento del rendimiento de los cultivos en los próximos años no podrá basarse tanto en la tecnificación agrícola, dada la necesidad de producir más con menos recursos.

Por este motivo, el papel de la mejora vegetal deberá ser necesariamente superior al observado en el pasado.

En este sentido, si bien no se ha estudiado en profundidad el potencial máximo que podrá aportar la tecnificación y las nuevas técnicas agronómicas (como la agricultura de precisión o el incremento de la diversidad funcional), se estima que estas soluciones, como máximo, podrán aportar un 40% del incremento de rendimientos en las próximas décadas. De manera que el 60% restante deberá ser aportado por otras alternativas, principalmente la mejora vegetal.

Figura 66. Incremento de rendimientos en la UE aportados por la mejora vegetal y por las mejoras agronómicas entre 1990 y 2020. Máximo incremento de rendimiento que podrán aportar las mejoras agronómicas entre 2020 y 2050 y necesidad de incremento de rendimientos en este período que deberá ser aportado por la mejora vegetal



Fuente: elaboración propia a partir de datos de base de la FAO y de Noleppa S., Calrsburg, M., 2021.

³³ The socio-economic and environmental values of plant breeding in the EU and for selected EU member states. Noleppa S., Calrsburg M., 2021.

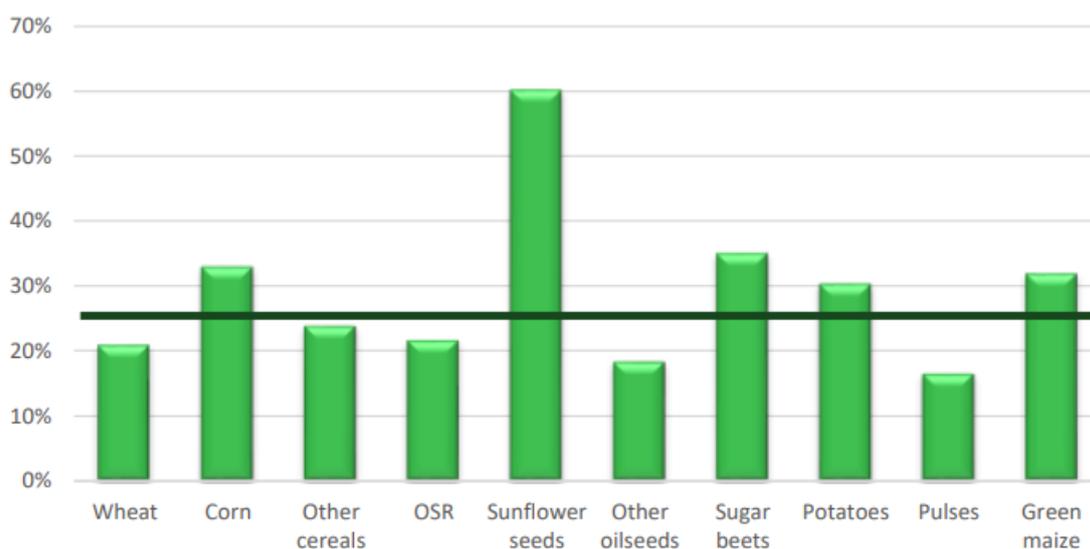
³⁴ Aportación social, económica y ambiental del sector obtentor en España; Institut Cerdà, 2021.

Tal y como puede observarse en la figura anterior, el ritmo de la innovación en mejora vegetal de aquí a 2050 deberá ser un 60% más acelerado que el observado en las tres décadas anteriores con objeto de alcanzar los objetivos para el año 2050. Como se puede comprobar en el marco del capítulo 3.2., las nuevas técnicas de edición genética permitirían conseguir esta aceleración necesaria. En caso de no implementarse estas técnicas a escala europea, no sería posible alcanzar la mejora de rendimiento necesaria mediante técnicas tradicionales. Tal y como se puede ver en la siguiente figura, mediante técnicas tradicionales, en el mejor de los escenarios, la mejora de rendimiento en 2040 sería de un 26,3%.

Para alcanzar los objetivos, el ritmo de innovación en mejora vegetal hasta el 2050 deberá ser un 60% más acelerado que el observado en las tres décadas anteriores.

Las nuevas técnicas de edición genética permitirían conseguir esta aceleración.

Figura 67. Ganancia potencial simulada para los cultivos principales herbáceos en la UE en 2040 mediante técnicas de breeding tradicionales



Fuente: The socio-economic and environmental values of plant breeding in the EU and for selected EU member states. Noleppa S., Carlsburg M., 2021.

En este sentido, tal y como se ha visto, para **producir más con menos recursos en un escenario de cambio climático**, el paradigma agrícola *business as usual* queda obsoleto. Siendo **necesaria una nueva revolución agrícola que permita intensificar de forma sostenible la agricultura** y que garantice la seguridad alimentaria a la población actual y futura. Asimismo, dicha intensificación sostenible debe ir acompañada de la **adaptación de los cultivos a los nuevos escenarios climáticos** que afectarán al planeta en los años venideros, para los cuales es necesario adaptar las variedades agrícolas actuales.

En este contexto, la mejora vegetal desempeña un papel esencial en los desafíos actuales del suministro alimentario y deberá seguir desempeñándolo todavía más a futuro. A lo largo de la historia, ha sido una **compañera constante de la humanidad en su búsqueda por obtener variedades de cultivos más productivas, resistentes y adaptadas a diversas condiciones ambientales.** Hoy en día, mediante la mejora vegetal, desarrollada por los obtentores y los

científicos, los agricultores han logrado desarrollar cultivos con mayor rendimiento, mejor calidad nutricional y resistencia a enfermedades y plagas. Es a través de la mejora vegetal que se pueden obtener cultivos más eficientes y sostenibles, contribuyendo así a garantizar la seguridad alimentaria y el bienestar de las generaciones presentes y futuras.

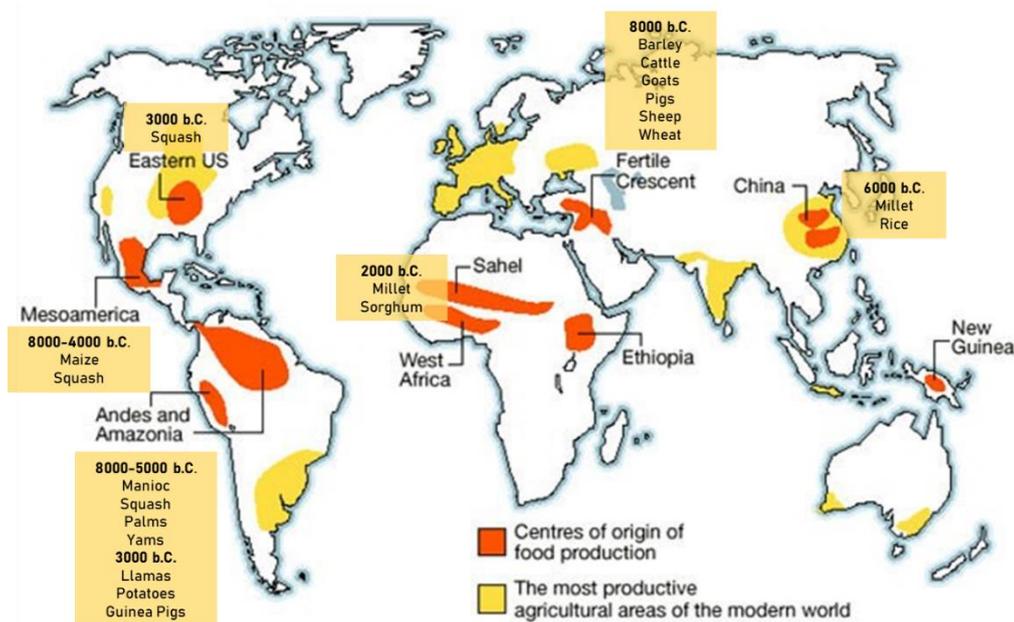
Para producir más con menos recursos en un escenario de cambio climático, el paradigma agrícola business as usual queda obsoleto. Siendo necesaria una nueva revolución agrícola que permita intensificar de forma sostenible la agricultura y adaptar los cultivos a los nuevos escenarios climáticos.

3.1. La evolución de la mejora vegetal: de los orígenes de la agricultura a la actualidad

a. La mejora vegetal en los orígenes de la agricultura

El proceso de domesticación de especies agrícolas consistió en la selección humana de plantas silvestres con el objetivo de adaptarlas a sistemas de cultivo, permitiendo el paso de sociedades nómadas a sedentarias, y así dando paso al origen de pueblos, ciudades y civilizaciones enteras.

Figura 68. Orígenes de la domesticación de plantas de interés agrícola



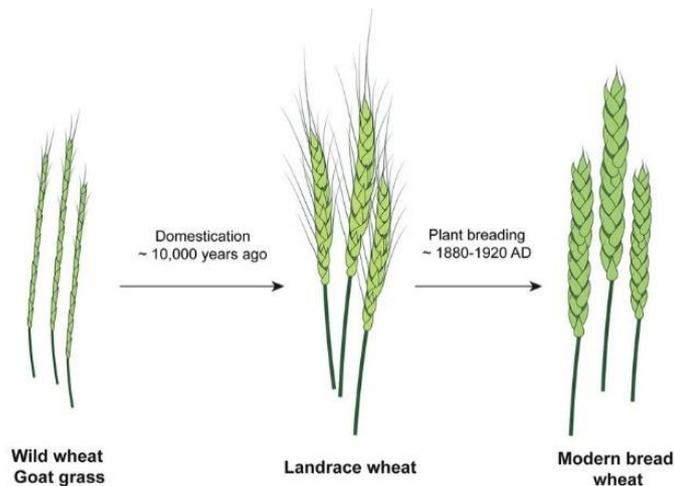
Adaptado de: *Evolution, consequences and future of plant and animal domestication*. Diamond J., 2002.

Desde el Creciente Fértil hasta Mesoamérica y China, este proceso de domesticación se inició en diferentes partes del mundo desconectadas entre sí (ver figura anterior). A lo largo de cientos de años, debido a su cultivo y expansión alrededor del mundo, se fue dando lugar a variedades de cultivo diferenciadas, debido a un proceso combinado de selección natural y selección

intuitiva por parte de los agricultores, que fueron favoreciendo aquellas plantas con una mayor parte comestible y mejor adaptadas a su entorno³⁵.

De esta forma, de forma inconsciente, se fue modificando la genética de los diferentes cultivos de manera que fueran más útiles para los humanos y se consiguieron variedades adaptadas a las condiciones ambientales de cada región (ver siguiente figura). Los rendimientos de estas variedades (conocidas en la actualidad como variedades locales o tradicionales) eran muy bajos comparados con las variedades cultivadas actualmente, pero permitían cierta estabilidad bajo las variaciones ambientales situadas dentro de la normalidad a lo largo de la historia³⁶.

Figura 69. Cambios en el fenotipo de las plantas debido a su domesticación y mejora



Fuente: *Global Role of Crop Genomics in the Face of Climate Change*. Pourkheirandish M. et al., 2020.

b. Evolución de la ciencia y la tecnología en la mejora vegetal

El siglo XVII dio inicio al movimiento de la ilustración, que inspiró profundos cambios culturales y sociales, así como a una revolución científica que cambiaría el paradigma de la ciencia para siempre. Se empezó a concebir a la ciencia como una herramienta al servicio de la humanidad, y este contexto impulsó grandes avances en todas las disciplinas científicas, incluidas la genética y la botánica. Fue en 1694 cuando se demostró el sexo de las plantas y se describieron los primeros métodos para cruzarlas, basados en ciencia. Pese a no reconocer todavía la diferencia entre qué aspectos estaban influenciados por la propia genética de la planta y cuáles debidos a las variaciones ambientales, se empezaron a desarrollar métodos para seleccionar y obtener variedades con características concretas. En este sentido, en 1727 se estableció la primera empresa de mejora vegetal en Francia, por parte de la familia de los Vilmorin, que describirían un método sistemático para el desarrollo de variedades de remolacha azucarera y contribuirían de forma extensa al conocimiento de la mejora vegetal durante más de 200 años. Por otro lado, gracias a estos avances globales, en 1834 se obtuvieron fresas cultivables para comercializar como alimento en el Norte de América (la Fresa Hover), especie que hasta el momento solo se

³⁵ *The molecular genetics of crop domestication*. Doebley, J.F., et al. 2006.

³⁶ *Global Role of Crop Genomics in the Face of Climate Change*. Pourkheirandish, M., et al, 2020.

cultivaba en jardines con motivo decorativo. Asimismo, también se desarrollaron variedades de otros cultivos para su producción a gran escala^{37,38}.

En definitiva, durante los siglos XVIII y XIX hubo muchos descubrimientos científicos destacables que contribuyeron a un mayor entendimiento de las plantas y su cultivo, lo que supuso el lanzamiento de nuevas variedades y alimentos al mercado. Por otro lado, en el ámbito científico, cabe destacar el papel clave del botánico Gregor Mendel, que en 1865 publicó su investigación sobre como ciertos rasgos del guisante se transmitían a generaciones posteriores, dando origen al conocimiento sobre la herencia genética.

No obstante, la importancia de Mendel no fue reconocida hasta el siglo XX, donde se redescubrieron sus experimentos y, acompañado de una mayor comprensión sobre el funcionamiento del material genético (el ADN), se avanzó exponencialmente en la comprensión de las características y genética de las plantas, así como en el desarrollo de variedades. En 1905, East y Shull describieron el vigor híbrido en maíz, y contribuyeron al lanzamiento de variedades con una productividad mucho mayor en comparación a las variedades de maíz de polinización libre³⁹. Algunos años más tarde, en 1916, Jones y Gilman describirían un proceso de selección de coles resistentes a la roya amarilla. Y como este, existen muchos más ejemplos de cómo un mayor conocimiento científico en diferentes disciplinas y la experimentación con cruces de plantas para obtener variedades concretas permitió avanzar al sector y empezar a obtener variedades con mayores productividades respecto las tradicionales, incluyendo adaptaciones al medio o resistencias a enfermedades o plagas concretas.

Figura 70. Variedad de trigo convencional (izquierda) y variedad de trigo semi-enana (derecha)



Fuente: Wheat: A crop in the bottom of the Mediterranean diet. Royo C., Soriano J.M, Alvaro F (2017).

Un punto de inflexión de la historia reciente de la mejora vegetal fue la obtención de variedades de alto rendimiento de trigo, maíz y arroz en los años 60, en una iniciativa liderada por Norman

³⁷ *History of Plant Breeding, Plant Breeding Overview (HS 521) North Carolina State University, sin fecha.;*

³⁸ *Will the EU stay out of step with science and the rest of the world on plant breeding innovation? Jorasch P., 2020.*

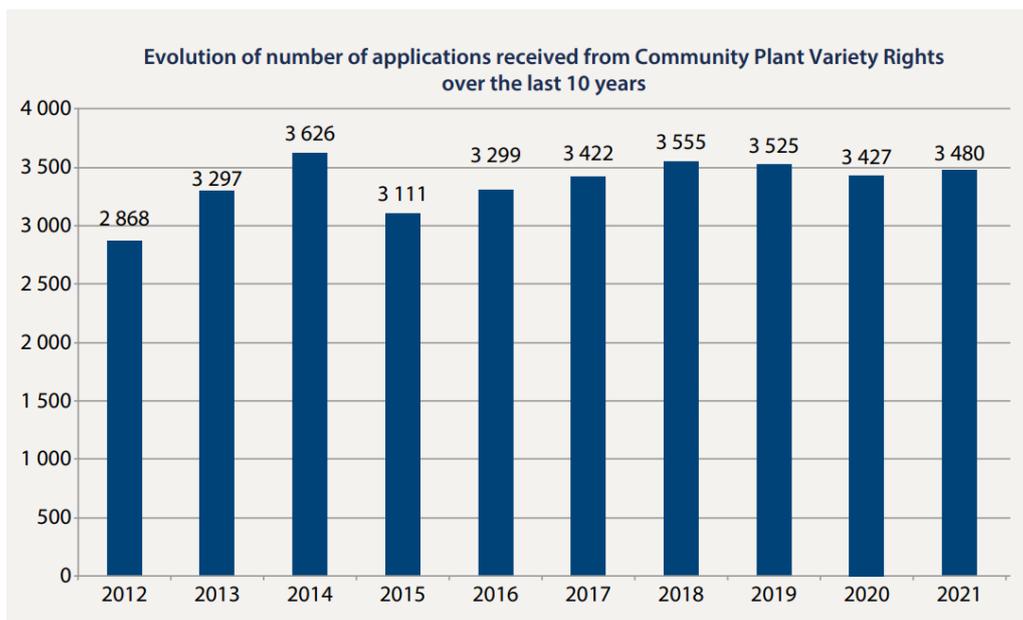
³⁹ *Heterosis: Emerging ideas about hybrid vigour. Baranway, V., 2012*

Borlaug y encabezada por el Centro de Mejora de Maíz y Trigo (CIMMYT) y el Centro de Investigación Internacional del Arroz (IRRI). La llamada Revolución Verde, permitió obtener variedades de alto rendimiento, que podían ser plantadas en mayor densidad y con alturas de cañas menores, gracias al cruce con variedades semi-enanas, de forma que la planta destinara más energía a la producción de grano. El cultivo de estas nuevas variedades permitió aumentar los rendimientos de forma masiva, evitó el hambre de millones de personas, aumentó los ingresos de los agricultores, redujo las emisiones de gases de efecto invernadero, redujo el uso de la tierra para la agricultura y contribuyó a la disminución de la mortalidad infantil. Por ejemplo, India, un país que se enfrentaba regularmente a hambrunas hasta el 1960, pasó a ser exportador neto de cereales a finales de los años 70 gracias a la adopción de estas nuevas variedades.

3.2. La mejora vegetal en la actualidad

La obtención de variedades vegetales se ha ido perfeccionando y sofisticando a medida que los conocimientos en ciencias básicas y estadística han ido evolucionando, dando lugar a una innovación constante del sector. Como resultado de los avances científicos y la inversión en I+D en el sector obtentor, tanto en el ámbito público como privado, anualmente se solicita el registro de miles de nuevas variedades vegetales desarrolladas en el ámbito europeo (ver siguiente figura).

Figura 71. Evolución del número de aplicaciones recibidas para la protección comunitaria de variedades vegetales



Fuente: Annual Report 2021. Community Plant Variety Office, 2022.

El sector de la obtención y mejora vegetal en España

*En el ámbito nacional, el sector obtentor está representado por la Asociación Nacional de Obtentores Vegetales (ANOVE) que agrupa a 59 organizaciones, que facturan en conjunto más de 733 millones de euros y **generan más de 15.000 puestos de trabajo**. Las empresas de obtención vegetal **destinan anualmente 105 millones de euros en I+D+i**, representando una intensidad del 14% respecto a la facturación, siendo uno de los sectores de la economía española que mayor porcentaje de facturación dedica a la innovación.*

*Asimismo, **gracias a la innovación continua en variedades mejoradas y semilla certificada**, entre la década de los 90 y 2018 se logró una **producción acumulada adicional de 62 millones de toneladas debido a los incrementos de productividad del trigo blando, maíz, tomate y arándano**. Estos incrementos productivos, a su vez, supusieron un **incremento de los ingresos de los agricultores de 640 millones de € anuales** para los cultivos seleccionados, así como una aportación al conjunto de la economía española en forma de Valor Añadido Bruto (VAB) de entre 890 y 1.020 millones de euros en los últimos 30 años. También se ha logrado una reducción en el uso de fertilizantes y fitosanitarios, así como un menor consumo hídrico y energético gracias a los incrementos productivos debidos a la mejora³⁵.*

Para la mejora de especies vegetales actualmente **se utilizan dos tipos de herramientas: unas para evaluar el material genético que contiene la planta**, como la secuenciación de ADN y el uso de marcadores moleculares; y por otro lado **herramientas capaces de influir variabilidad en las plantas**, con el objetivo de obtener características concretas. En este sentido, se entiende como técnicas de mejora convencionales todas aquellas técnicas aplicadas a una planta que resultan en **modificaciones en el material genético de la planta que podrían acontecer de forma aleatoria en la naturaleza**. Por ejemplo, se estima que en una planta de trigo pueden llegar a generarse 238 mutaciones aleatorias en el ADN de la planta en cada generación⁴¹. Estos cambios espontáneos se derivan de procesos donde la copia del ADN de la planta para reproducirse no es perfecta, y es uno de los factores por los que existen tantas variedades distintas de plantas, animales, y, en definitiva, de seres vivos.

Como herramientas capaces de influir variabilidad se han usado **tradicionalmente radiaciones ionizantes o ciertos compuestos químicos** (técnicas de mutagénesis aleatoria), que permiten introducir centenares y miles de cambios genéticos aleatorios en las plantas. Estos cambios genéticos permiten generar plantas con mucha variabilidad, pero al mismo tiempo también producen muchos cambios no deseables, que luego tratan de eliminarse mediante el cruce con diferentes plantas de distintos tipos⁴².

Más allá de las técnicas tradicionales de mejora descritas anteriormente, **en los últimos 20 años se han desarrollado nuevas técnicas de edición genética**, que permiten modificar el ADN de las plantas de una manera más precisa y eficiente. Éstas pueden implicar la introducción de material genético externo al organismo en cuestión. Este material genético puede provenir de otra especie (transgénesis), puede ser una versión mejorada del material genético de la misma especie o cercana (intragénesis) o puede ser una copia exacta del material genético ya presente en la misma especie (cisgénesis). Asimismo, se han desarrollado también técnicas de mutagénesis dirigida, que permiten modificar la secuencia de ADN de la planta en una

⁴⁰ Aportación social, económica y ambiental del sector obtentor en España. Institut Cerdà, 2021.

⁴¹ Genome-edited crops and 21st century food Systems challenges. European Parliament Research Service, 2022.

⁴² Traditional and Modern Plant Breeding Methods with Examples in Rice (*Oryza sativa* L.). Breseghello, F., Siqueira, A., 2013.

localización precisa del genoma, sin introducir nuevos genes. En este contexto, la normativa europea actual se elaboró para la regulación de los organismos modificados genéticamente por transgénesis, datando de un contexto previo a la aparición de las nuevas técnicas de edición genética. Es por ello que se está elaborando una propuesta de regulación específica para evitar los inconvenientes que plantea la normativa todavía vigente.

Las nuevas técnicas de edición genética permiten mejorar las características de las plantas de manera más eficiente y con mayor precisión que los métodos tradicionales de mejoramiento genético.

En cuanto a las técnicas que pueden **editar el genoma de las plantas sin introducir material genético de otras especies, dos de las más conocidas y utilizadas en investigación científica son por ejemplo TALEN y CRISPR-Cas**. Ambas son técnicas que actúan como "tijeras moleculares" que cortan el ADN de manera muy precisa.

En CRISPR-Cas, CRISPR actúa como una guía y "busca" una secuencia específica de ADN dentro del genoma de la planta que se desea editar. Una vez que CRISPR encuentra el lugar correcto, una enzima llamada Cas9 corta el ADN en ese lugar específico. Posteriormente, el sistema de reparación natural de la planta repara el corte introduciendo cambios en el ADN, lo que permite agregar, eliminar o modificar genes según sea necesario. TALEN es otra herramienta de edición genética, una forma de proteína que también puede cortar el ADN de manera precisa y al igual que con CRISPR-Cas, el sistema de reparación natural de la planta entra en acción una vez se realiza el corte molecular y lo repara, permitiendo realizar cambios genéticos específicos.

Ambas técnicas, CRISPR-Cas y TALEN, han revolucionado la edición genética de plantas al permitir a los científicos realizar cambios precisos y rápidos en los genes. **Estas técnicas ofrecen la posibilidad de mejorar las características de las plantas de manera más eficiente y con mayor precisión que los métodos tradicionales de mejoramiento genético**. No obstante, pese a ser muy precisas con los cambios genéticos deseados y tener una probabilidad de mutaciones adicionales muy baja en comparación con las técnicas de mejora tradicionales, en Europa actualmente no se encuentran reguladas bajo las mismas normas que las técnicas tradicionales⁴³. Por otro lado, en otros países del mundo ya se ha puesto en marcha la comercialización de diversos alimentos editados genéticamente (Figura 72).

*Figura 72. Alimentos editados genéticamente (no transgénicos) con permiso para su comercialización (Julio 2023)**

Alimento	Tipo de modificación	Primer país de aprobación	Empresa comercializadora	Año de aprobación	Fuente
Patata	Edición de un gen que reduce las magulladuras y la oxidación de las patatas.	EEUU	J.R. Simplot	2015	44
Manzana	Edición de un gen que reduce la expresión de una enzima, retrasando el inicio de la oxidación (pardeamiento).	Canadá	Okanagan Specialty Fruits	2015	45

⁴³ *Genome-edited crops and 21st century food Systems challenges. European Parliament Research Service, 2022.*

⁴⁴ *USDA approves next-generation GM Potato, Waltz E. et al., 2015*

⁴⁵ *Renseignements sur les aliments nouveaux - Pommes Arctic® GD743 et GS784, Section des aliments nouveaux, Direction des aliments, Direction générale des produits de santé et des aliments, 2015*

Alimento	Tipo de modificación	Primer país de aprobación	Empresa comercializadora	Año de aprobación	Fuente
Seta	Edición de un gen reduce la expresión de una enzima, retrasando el inicio de la oxidación (pardeamiento).	EE. UU.	The Pennsylvania State University	2016	46
Sésamo bastardo	Sésamo bastardo (<i>Camelina Sativa</i>) enriquecido con Omega-3.	EE. UU.	Yield10 Bioscience	2016	47
Soja	Edición de dos genes que permiten aumentar el nivel de ácidos grasos con alto contenido oleico.	EE. UU.	Calyxt	2019	48
Tomate	Edición de un gen para promover el enriquecimiento del compuesto natural ácido gamma-aminobutírico (GABA), aminoácido que puede prevenir la presión alta en las personas.	Japón	SanaTech Seed Global Solutions	2021	49
Soja	Edición de dos genes que permiten aumentar el nivel de ácidos grasos con alto contenido oleico.	China	Shandong Shunfeng Biotechnology Co	2023	50
Hojas de mostaza	Edición de un gen para reducir el sabor picante y amargo, haciendo el alimento más apetecible para el consumidor.	EE. UU.	Pairwise	2023	51
Plátanos	Edición genética (inducción de silenciado de gen) de plátanos que permiten la maduración, pero no se pone marrón.	Filipinas	Tropic Biosciences	2023	52

* listado no exhaustivo

En el capítulo '4. Limitaciones con las que se encuentra la mejora', se explora en detalle el background legislativo que regula las diferentes técnicas, y porque Europa está en la cola a nivel mundial en cuanto a apertura en la innovación en técnicas de mejora vegetal: mientras en algunos países como EEUU, China o Japón ya se comercializan productos alimentarios procedentes de plantas editadas con nuevas técnicas de edición genética, en Europa la legislación todavía los contempla, hasta que no se apruebe la nueva propuesta de Directiva, como si fueran transgénicos tradicionales.

⁴⁶ *Gene-edited CRISPR mushroom escapes US regulation*, Waltz E., 2016

⁴⁷ *With a free pass, CRISPR-edited plants reach market in record time*, Waltz E. 2018

⁴⁸ *Calyxt Announces Next Generation Premium Soybean Product Line Performance Best-In-Class for High Oleic, Ultra-Low Linolenic Profile*, Roseville M. et al., 2021

⁴⁹ *GABA-enriched tomato is first CRISPR-edited food to enter market*, Waltz E. et al., 2021

⁵⁰ *China approves safety of first gene-edited soybean crop to boost food security*, Shandong Shunfeng Biotechnology Co., Ltd., 2023

⁵¹ *Targeted Mutagenesis of the Multicopy Myrosinase Gene Family in Allotetraploid Brassica juncea Reduces Pungency in Fresh Leaves across Environments*, Karlson D. et al., 2022

⁵² *A banana that doesn't go bad so fast approved by the Philippines*, Meir O. et al., 2023

3.3. Potencial de contribución de la mejora vegetal: ¿Cómo pueden ayudar las nuevas herramientas de edición genética en mejora vegetal a dar respuesta a los retos del suministro alimentario?

a. Beneficios de las nuevas herramientas de mejora genética

Teniendo en cuenta los tipos de nuevas herramientas de edición genética, como la mutagénesis dirigida, la cisgénesis o intragénesis mediante CRISPR-Cas, que permiten modificar o incluir genes de la misma especie o especies compatibles (es decir, herramientas que pueden producir plantas no transgénicas), éstas presentan distintos beneficios en comparación con los métodos tradicionales de mejora:

1. **Precisión:** la edición genética permite modificaciones precisas y dirigidas a nivel de ADN, lo que hace posible a los científicos editar o insertar genes específicos con alta precisión. Esta precisión es ventajosa en comparación con los métodos de mejora tradicionales, que se basan en la recombinación genética o la mutagénesis no dirigida, y pueden resultar en la introducción de variaciones genéticas no deseadas.
Las nuevas técnicas genómicas permiten la edición génica sin alteraciones en la composición genética global de la variedad de cultivo, preservando sus características originales.
2. **Rapidez:** La tecnología de edición genética permite **acotar el proceso de obtención de una variedad en comparación con los métodos de mejora tradicionales**, que a menudo requieren múltiples generaciones de cruzamientos y selección para lograr rasgos deseados. La edición genética permite una introducción de rasgos más rápida, reduciendo el tiempo necesario para desarrollar variedades de cultivos mejoradas.
Estas técnicas permiten un mayor control que las tradicionales sobre los rasgos específicos que se desean introducir o modificar en los cultivos.
3. **Flexibilidad:** La tecnología de edición genética permite la modificación de genes en diferentes especies de plantas y ofrece una mayor flexibilidad para introducir rasgos deseables en cultivos diversos, ampliando el rango de posibles mejoras.
4. **Reducción del ligamiento genético:** Los métodos de mejora tradicionales a menudo encuentran el desafío del ligamiento genético, donde los **rasgos deseables están asociados con rasgos indeseables debido a su proximidad en el cromosoma**. La tecnología de edición genética permite la modificación directa de genes específicos, superando las limitaciones impuestas por el ligamiento genético y permitiendo la introducción dirigida de rasgos deseables.
Mediante el empleo de estas técnicas, el tiempo necesario para la obtención de nuevas variedades se reduce a la mitad, pasándose de los 8-10 años actuales a 4-6 años.
5. **Preservación del contexto genético de la variedad:** Los métodos de mejora tradicionales a menudo implican series extensas de cruzamientos y selección, lo que resulta en la mezcla de contextos genéticos. En cambio, las nuevas técnicas genómicas **permiten la edición génica sin alteraciones significativas**

en la composición genética global de una variedad de cultivo, preservando sus características originales y reduciendo la pérdida potencial de rasgos deseables.

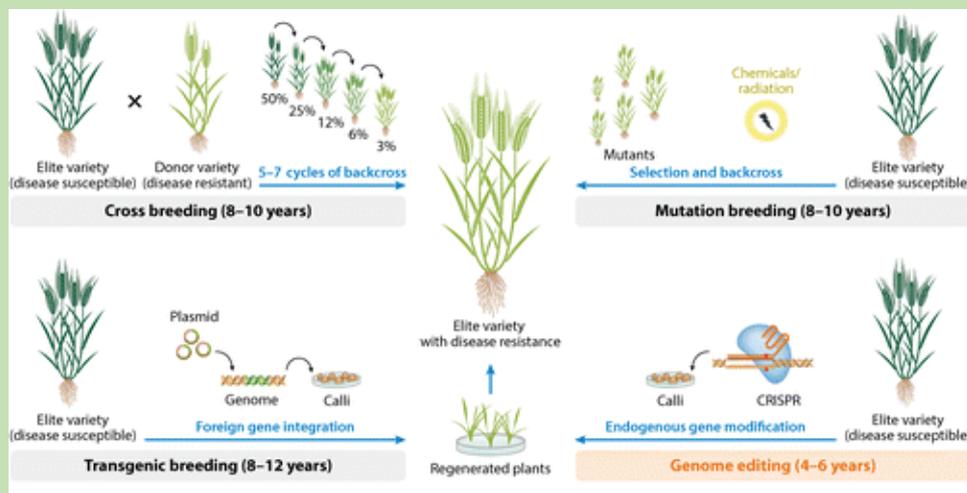
- Mayor control sobre los rasgos: Con la edición genética, los científicos tienen un mayor control sobre los rasgos específicos que desean introducir o modificar en los cultivos. **Este nivel de control es ventajoso en comparación con los métodos de mejora tradicionales, que a menudo implican interacciones genéticas complejas y pueden no permitir un control preciso sobre la herencia de los rasgos.**

Tiempo y coste en la innovación en mejora vegetal

Una de las mayores ventajas de la edición genética (genome editing) frente a la mejora tradicional (cross breeding o mutation breeding) o la transgénesis, es que **permite acortar los tiempos y costes de innovación**, lo que permitiría responder de forma más eficaz a los distintos retos (por ejemplo, la emergencia de una nueva variedad de virus o patógeno que afecte al cultivo a nivel global). **En cuando al tiempo para obtener una variedad mediante edición genética, este se reduce a la mitad frente a las otras técnicas, de tardar entre 8 a 10 años a poder conseguirla en 4 a 6 años**, tal y como muestra la Figura 73.

Se estima que mediante estas nuevas tecnologías (y mediante una regulación adaptada a sus características), **el coste de producir una nueva variedad en Europa puede ser de unos 4,5 millones de euros y aproximadamente 5 años, desde que se inicia la investigación hasta que se lleve al mercado**. Esto supone una diferencia significativa respecto a los costes y tiempos actuales que supone llevar una nueva variedad al mercado con las herramientas de mejora tradicionales⁵⁹.

Figura 73. Tiempo medio de producción de una nueva variedad vegetal con las características deseadas mediante diferentes técnicas de mejora vegetal



Fuente: CRISPR/Cas Genome Editing and Precision Plant Breeding in Agriculture. Chen K. et al., 2019.

En este sentido, es crucial fomentar el desarrollo de variedades que puedan adaptarse a nuevos entornos, sin necesidad de realizar grandes inversiones en maquinaria, tecnologías o metodologías de adaptación a nuevas condiciones ambientales. Mediante la mejora vegetal, **se promueve la innovación y la adaptación a nuevos entornos a través de la propia semilla**, mientras otras prácticas agronómicas requieren un proceso de transformación en el manejo. Las

⁵³ CRISPR/Cas Genome Editing and Precision Plant Breeding in Agriculture. Chen K. et al., 2019.

medidas de adaptación de las técnicas de cultivo al cambio climático son fundamentales para proteger el rendimiento agrícola ante la variabilidad climática, al tiempo que se aprovecha el potencial genético inherente en la diversidad de cultivos. Sin embargo, **es igualmente importante que estas medidas vayan acompañadas de variedades de cultivos mejor adaptadas a las condiciones actuales y futuras, desvinculando así la dependencia de insumos para aumentar la productividad.**

b. Las variedades obtenidas mediante edición genética tienen un alto potencial para dar respuesta a los retos del suministro alimentario

La edición genética de plantas ha abierto un amplio abanico de posibilidades en la obtención de variedades diversas y mejoradas. Gracias a las nuevas técnicas de edición genómica, se ha logrado desarrollar variedades que son resistentes al cambio climático, capaces de adaptarse a nuevas condiciones ambientales, más resistentes frente a plagas y enfermedades, y con una mejora significativa en su calidad y rendimiento.

Estas innovaciones ofrecen una prometedora respuesta a los desafíos específicos que enfrenta cada cultivo, permitiendo mantener una producción agrícola que pueda satisfacer las crecientes necesidades de la sociedad. Desde cultivos más resistentes a sequías y altas temperaturas hasta plantas adaptadas a suelos salinos o con mayor contenido nutricional, **la edición genética proporciona herramientas poderosas para abordar los desafíos concretos y mantener la seguridad alimentaria en un mundo en constante cambio.**

Es importante resaltar que los notables avances logrados en los últimos años en estos cultivos **son el resultado de dedicados esfuerzos de investigación tanto en el ámbito público como en el privado.** Estos esfuerzos se han enfocado a comprender a fondo la genética de las plantas de interés agrícola y en aplicar de manera práctica ese conocimiento en la generación de nuevas variedades mejoradas. Cabe destacar que **la gran mayoría los descubrimientos mencionados a continuación son posteriores a 2018, lo cual subraya la naturaleza emergente de estas tecnologías y las vastas posibilidades que ofrecen.** Aunque estos avances marcan un progreso significativo, es importante reconocer que aún la ciencia se encuentra en la fase inicial de exploración de todo el potencial que la edición genética puede brindar. De manera que únicamente se visualiza **la punta del iceberg de lo que estas tecnologías pueden lograr**, en el futuro se promoverán nuevas innovaciones que continuarán impulsando la capacidad para asegurar la seguridad alimentaria y abordar los retos agrícolas de manera sostenible desde el primer eslabón de la cadena alimentaria.

En la siguiente sección, **se describen una serie de avances destacados en la mejora genética, mediante edición, de diversos cultivos de relevancia para el contexto español:** cereales, como el trigo, la cebada y el maíz; hortalizas, como el tomate y el pimiento; proteaginosas y oleaginosas, como la soja y el girasol; y, por último, legumbres, como las lentejas y los garbanzos.

c. Potencial de mejora del cultivo de trigo

El trigo común (*Triticum aestivum* L.) se encuentra entre los tres cultivos alimentarios más importantes a nivel mundial. Por consiguiente, los programas de mejora del trigo desempeñan un papel crucial en la seguridad alimentaria global. La caracterización de los genes que regulan rasgos agronómicos fundamentales y la búsqueda de nuevas formas de modificarlos resultan una prioridad para garantizar la seguridad alimentaria a escala global.

a. Resistencia del trigo a condiciones climáticas adversas

Los esfuerzos dedicados a la investigación de la genética del trigo han permitido identificar un grupo de genes relacionados con la longitud de las raíces de este cereal. Según un estudio publicado en 2023: **una menor dosis de este gen produce plantas con raíces más largas**, por ello, los científicos esperan que estos hallazgos puedan llevar al mejoramiento de **cultivos de trigo más resistentes a la sequía**⁵⁴. Este hecho es de especial relevancia en el contexto español, donde la mayoría del cultivo de trigo se encuentra en secano.

b. Resistencia del trigo a plagas y enfermedades

Las enfermedades causadas por hongos, bacterias y virus pueden reducir drásticamente los rendimientos y la calidad del trigo. En un estudio reciente, se utilizó CRISPR/Cas9 para eliminar ciertos genes que hacen al trigo susceptible a enfermedades, como por ejemplo el gen MLO (Mildew-Resistance Locus): mediante la eliminación de 6 dotaciones de este gen, **se logró una variedad con una mayor resistencia al oídio**, una enfermedad provocada por hongos⁵⁵. Asimismo, otro equipo de investigación científico logró incorporar una resistencia sólida a la enfermedad del oídio, **sin afectar negativamente al crecimiento y rendimiento de la planta**⁵⁶.

c. Mejora de las cualidades agronómicas del trigo

Diversas investigaciones recientes en la genética del trigo han logrado abrir posibilidades para la mejora de sus capacidades agronómicas y de rendimiento. En un estudio publicado en 2021, se descubrió que, mediante la edición de un gen concreto, se podía lograr una forma más eficiente para la planta de utilizar el nitrógeno (es decir, captándolo mejor), permitiendo producir cosechas sin problemas en el crecimiento con un menor uso de fertilizante⁵⁷. La modificación de este gen podría permitir mantener rendimientos en el cultivo de cereales a la vez que se reduce el input de fertilizantes, dando respuesta a la estrategia europea 'Farm to Fork' sin amenazar el suministro alimentario.

Por otro lado, otras investigaciones han logrado modificar la estructura del trigo mediante la modificación de un gen (DUO-B1) con CRISPR, consiguiendo aumentar el número de granos por espiga. Este tipo de modificación podría contribuir a aumentar el rendimiento en condiciones de campo sin afectar otros rasgos agronómicos importantes. Este gen no se ha usado hasta el momento en programas de mejoramiento, por lo que tiene un gran potencial para poder contribuir al aumento del rendimiento del trigo⁵⁸.

d. Mejora de las propiedades organolépticas y la calidad nutricional del trigo

Un equipo de biólogos del Rothamsted Research en el Reino Unido ha logrado utilizar el sistema de edición genética CRISPR-Cas9 para inactivar el gen de la asparagina en trigo. Asimismo, por primera vez en Europa, se ha realizado un ensayo de campo de un cultivo modificado con CRISPR. Los resultados, obtenidos en 2023, mostraron una reducción de aproximadamente el 50% en la producción de asparagina en el grano, en comparación con las plantas no modificadas

⁵⁴ *Dosage differences in 12-OXOPHYTODIENOATE REDUCTASE genes modulate wheat root growth. Gabay, G. et al., 2023.*

⁵⁵ *Recent advances in CRISPR/Cas9 and applications for wheat functional genomics and breeding. Li, J., Li, Y., Ma, L., 2021.*

⁵⁶ *Gene-edited wheat resists dreaded fungus without pesticides. Stokstad, E., 2022.*

⁵⁷ *Increasing yield potential through manipulating of an ARE1 ortholog related to nitrogen use efficiency in wheat by CRISPR/Cas9. Zhang, J. et al., 2021.*

⁵⁸ *Improving bread wheat yield through modulating an unselected AP2/ERF gene. Wang, Y. et al., 2022.*

utilizadas en el mismo estudio. Este hecho tiene especial relevancia, ya que la asparagina es una molécula que se cree que tiene potencial carcinogénico para los seres humanos⁵⁹.

En España, un equipo en el Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC) ha conseguido eliminar los genes de las alpha-gliadinas responsables de disparar la respuesta inmune en patologías relacionadas con la ingesta de gluten. Las alpha-gliadinas de trigo son un conjunto de proteínas presentes en el grano y que explican casi el 90% de la respuesta inmune después de la ingesta de trigo. Utilizando CRISPR/Cas9, este equipo ha conseguido eliminar todos los genes de las alpha-gliadinas que contienen epítomos inmunogénicos. Las líneas de trigo resultantes muestran una respuesta inmune un 85% menos que el trigo estándar.

d. Potencial de mejora del cultivo de cebada

La cebada (*Hordeum vulgare*) es un cultivo vital para la seguridad alimentaria, siendo utilizada en la producción de una amplia gama de alimentos básicos y piensos para animales. Asimismo, es una fuente nutricional importante, rica en carbohidratos, proteínas, fibras y nutrientes esenciales, que contribuye a una dieta equilibrada y saludable. **En España, ocupa el segundo lugar de volumen de producción de cereales**, solo por detrás del trigo blando⁶⁰.

a. Resistencia de la cebada a condiciones climáticas y abióticas adversas

En la cebada todavía no se han logrado variedades específicas adaptadas a ciertas condiciones limitantes, como por ejemplo la sequía, debido a que existen numerosas vías metabólicas y genéticas en la cebada que regulan su respuesta al estrés por déficit de agua. No obstante, un estudio publicado en 2022⁶¹ **identifica diversos conjuntos de genes candidatos a ser modificados para desarrollar nuevos cultivares con una mayor tolerancia a la sequía** y asegurar el bienestar del cultivo bajo condiciones adversas.

Por otro lado, sí que se han podido desarrollar algunas **variedades con mayor resistencia al estrés salino**, gracias a la modificación con CRISPR de ciertos genes que codifican para enzimas relacionadas con la vía metabólica del inositol⁶².

b. Resistencia de la cebada a plagas y enfermedades

Mediante la edición de genes relacionados con la susceptibilidad a distintos patógenos, se han logrado recientemente variedades resistentes a éstos: desde la resistencia a hongos con gran afectación al cultivo de cebada⁶³, como resistencias contra distintos virus como el virus del mosaico de la cebada (cuya presencia llega a causar pérdidas de hasta el 50% de un cultivo⁶⁴), o el virus del enanismo del trigo (que también afecta a la cebada)⁶⁵.

⁵⁹ Gene-edited wheat reduces levels of cancer risk chemical when cooked. Wilson, C., 2023.

⁶⁰ según datos de 2020. Cereales, Cultivos herbáceos e industriales. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

⁶¹ Barley with improved drought tolerance: Challenges and perspectives. Elakhdar, A. et al., 2022.

⁶² Allelic Variants of CRISPR/Cas9 Induced Mutation in an Inositol Trisphosphate 5/6 Kinase Gene Manifest Different Phenotypes in Barley. Vlčko, T. y Ohnoutková, L., 2020.

⁶³ CRISPR/SpCas9-mediated KO of epigenetically active MORC proteins increases barley resistance to *Bipolaris* spot blotch and *Fusarium* root rot. Galli, M. et al., 2022.

⁶⁴ Novel resistance to the Bymovirus BaMMV established by targeted mutagenesis of the PDIL5-1 susceptibility gene in barley. Hoffie, R.E. et al., 2022.

⁶⁵ Creating highly efficient resistance against wheat dwarf virus in barley by employing CRISPR/Cas9 system. Kis, A. et al., 2019.

c. Mejora de las características agronómicas de la cebada

Hay distintos aspectos agronómicos que han podido ser modificados y tienen impactos directos en la biomasa y la productividad de la cebada, como modificaciones en la regulación de citoquininas⁶⁶, y mejoras en la absorción del nitrógeno en condiciones limitantes de fertilizantes, mediante la edición de genes específicos (HvARE1)⁶⁷. La edición genética también abre la posibilidad de moderar el fotoperiodo de la cebada, adaptando la planta a diferentes condiciones y horas de sol⁶⁸.

d. Mejora de las propiedades organolépticas de la cebada

Asimismo, la edición genética permite modificar genes del grano de la cebada, especialmente para mejorar su calidad nutricional, aspecto que no había podido ser abordado en las últimas décadas debido a la imposibilidad, mediante técnicas tradicionales, de aislar estos genes en el desarrollo de variedades más productivas en los programas de mejora vegetal⁶⁹.

e. Potencial de mejora del cultivo de maíz

Cada año se cultivan en España más de 300.000 hectáreas de maíz (*Zea mays*), siendo un cultivo de importancia para la industria de alimentación animal. Gran parte de su cultivo es irrigado, con tal de obtener una mayor productividad.

a. Resistencia del maíz a condiciones climáticas y abióticas adversas

En el cultivo del maíz se han logrado conseguir variedades editadas genéticamente adaptadas a condiciones de escasez de agua,⁷⁰ o con una mayor tolerancia a episodios de sequía, sin afectar gravemente a su productividad, pese a que aún no están comercializadas. Teniendo en cuenta las condiciones limitantes de agua en el mediterráneo en la actualidad, y más especialmente en un futuro próximo, esta tolerancia al estrés hídrico es relevante en un cultivo que se encuentra mayoritariamente en condiciones de riego⁷¹.

b. Resistencia del maíz a plagas y enfermedades

Mediante la edición de genes relacionados con la susceptibilidad a distintos patógenos, se han logrado recientemente resistencias del maíz a éstos, por ejemplo, mediante la edición del gen de la Lipoxigenasa 3, logrando resistencia al carbón del maíz, enfermedad provocada por el hongo *Ustilago maydis*⁷². También hay ejemplos de resistencias a otros patógenos logrados con edición genética.

Por otro lado, en marzo del 2023, se anunció el lanzamiento al mercado de una variedad de maíz editada genéticamente que permite combinar y reposicionar los rasgos de resistencia a

⁶⁶ *Modification of Barley Plant Productivity Through Regulation of Cytokinin Content by Reverse-Genetics Approaches.* Holubová K. et al., 2018.

⁶⁷ *CRISPR/Cas9 gene editing and natural variation analysis demonstrate the potential for HvARE1 in improvement of nitrogen use efficiency in barley.* Karunaratne, S.D. et al., 2022.

⁶⁸ *Major genes determining yield-related traits in wheat and barley.* Nadolska-Orczyk, A. et al., 2017.

⁶⁹ *Gene editing for barley grain quality improvement.* Garcia-Gimenez, G. y Jobling, S.A., 2022.

⁷⁰ *CRISPR-Modified Corn May Soon be Ready For Market,* Popular Science, 2016

⁷¹ *ZmLBD5, a class-II LBD gene, negatively regulates drought tolerance by impairing abscisic acid synthesis.* Feng, X. et al., 2022.

⁷² *Engineering Smut Resistance in Maize by Site-Directed Mutagenesis of LIPOXYGENASE 3.* Pathi, K.M. et al. 2020.

enfermedades que ya se encuentran en el genoma del maíz, aumentando aún más el potencial de rendimiento⁷³.

c. Mejora de las características agronómicas del maíz

El maíz es un cultivo ampliamente estudiado, por lo que hay bastante conocimiento de su genética para incorporar modificaciones que permitan mejorar sus características agronómicas. Por ejemplo, un equipo de investigación ha logrado crear un híbrido de maíz con un mayor rendimiento mediante deleciones en su genoma⁷⁴. Asimismo, ensayos de campo realizados en China de maíz editado genéticamente, han permitido obtener un rendimiento un 10% superior frente a la variedad de base⁷⁵.

d. Mejora de las cualidades organolépticas o calidad nutricional del maíz

En cuanto a la mejora de la calidad nutricional del maíz, se ha logrado editar una variedad de maíz para dar lugar a una síntesis reducida de ácido fítico (un anti-nutriente) mediante la edición genética de un gen concreto (IPK1), permitiendo así la creación de nuevas variedades con mejor perfil nutricional⁷⁶.

f. Potencial de mejora del cultivo de tomate

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es uno de los cultivos más importantes del sector agrícola español, distinguiéndose España por su papel exportador al resto de Europa de esta hortaliza. Asimismo, es una especie a la que se han dedicado muchos esfuerzos de investigación para desarrollar variedades con mayor calidad.

a. Resistencia del tomate a condiciones climáticas y abióticas adversas

Estudios recientes han logrado conseguir **variedades de tomate con mayor tolerancia al déficit de agua**, por ejemplo, mediante la edición de receptores de la giberelina, suprimiendo la proliferación del xilema y reduciendo así la pérdida de agua⁷⁷, o mediante la reducción de la expresión de un factor de transcripción (proteína que ayuda a controlar la expresión de los genes) que se expresa en fruto de raíz⁷⁸.

Asimismo, también ha destacado en los últimos años el **desarrollo de resistencias al estrés salino**, mediante la escisión de un gen que regula la respuesta de la planta a entornos salinos, dando lugar a una mayor tolerancia en el estado de germinación y el estado vegetativo a estas condiciones⁷⁹.

⁷³ Gene Editing Technology to Fight Corn Disease. ISAAA 2023.

⁷⁴ Superior field performance of waxy corn engineered using CRISPR-Cas9. Gao, H et al., 2020.

⁷⁵ Rice and maize yields boosted up to 10 per cent by CRISPR gene editing. Ly, C. 2022.

⁷⁶ Precise genome modification in the crop species *Zea mays* using zinc-finger nucleases. Shukla, V.K., et al., 2009.

⁷⁷ Mutations in the tomato gibberellin receptors suppress xylem proliferation and reduce water loss under water-deficit conditions. Illouz-Eliaz, N. et al., 2020.

⁷⁸ CRISPR/Cas9 targeted mutagenesis of *SILBD40*, a lateral organ boundaries domain transcription factor, enhances drought tolerance in tomato. Liu, L, et al., 2020.

⁷⁹ CRISPR/Cas9-based precise excision of *SlHyPRP1* domain(s) to obtain salt stress-tolerant tomato. Tran, M.T. et al., 2021.

b. Resistencia del tomate a plagas y enfermedades

Existen multitud de modificaciones mediante edición genética que permiten la resistencia del tomate frente a plagas y enfermedades. En la base de datos de plantas editadas genéticamente de EU Sage, llegan a encontrarse hasta 27 variedades con resistencia a distintos patógenos⁸⁰.

Algunos ejemplos destacados van desde la mejora en la resistencia contra virus, como por ejemplo el del encrespamiento amarillo de la hoja del tomate⁸¹, el de fruto rugoso (ToBRFV)⁸² o el del pepino dulce (PepMV)⁸³ o la resistencia contra el hongo *Phytophthora infestans*⁸⁴, todos ellos causantes de pérdidas de cultivos y económicas muy significativas a nivel mundial.

c. Mejora de las cualidades agronómicas del tomate

Asimismo, la edición genética del tomate alberga un gran potencial en mejorar su productividad. Un estudio de 2017 revela que mediante la edición con CRISPR de rasgos genéticos cuantitativos, se podría incrementar el número de flores o el tamaño del fruto, hecho que puede conferir mejoras productivas en su rendimiento⁸⁵.

Otro de los descubrimientos recientes más relevantes en el tomate es la mutación de un gen que da lugar a un fenotipo de planta de menor altura y más compacta, compatible con su desarrollo en alta densidad productiva⁸⁶. Asimismo, en otro estudio reciente se identificaron genes relacionados con la domesticación del tomate, cuya modulación de la expresión permitirían disminuir los tallos secundarios del tomate no útiles, incrementando su densidad productiva⁸⁷.

d. Mejora de las propiedades organolépticas y la calidad nutricional del tomate

Uno de los campos de mayor proliferación de la investigación en la edición genética del tomate es en la mejora su calidad nutricional. De hecho, desde 2021, el tomate es el primer producto hortícola editado con CRISPR que ha llegado al mercado⁸⁸. Comercializado en Japón por la empresa Sanatech, este tomate está enriquecido con GABA, un neurotransmisor relacionado con la reducción de la presión arterial.

Asimismo, se han desarrollado tomates con cantidades incrementadas de carotenoides, licopenos y β -carotenos, compuestos vegetales con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias⁸⁹. Asimismo, también se ha logrado reducir el contenido de ácido oxálico en tomate mediante edición genética, un ácido que actúa como anti-nutriente⁹⁰.

⁸⁰ *Traits related to biotic stress tolerance. European Sustainable Agriculture Through Genome Editing, sin fecha.*

⁸¹ *Virus-induced CRISPR-Cas9 system improved resistance against tomato yellow leaf curl virus. Faal, P.G. et al., 2020.*

⁸² *Tomato brown rugose fruit virus resistance generated by quadruple knockout of homologs of TOBAMOVIRUS MULTIPLICATION1 in tomato, Ishikawa M. et al., 2022.*

⁸³ *Genome Editing of eIF4E1 in Tomato Confers Resistance to Pepper Mottle Virus, Yoon Y-J. et al., 2020.*

⁸⁴ *Editing miR482b and miR482c Simultaneously by CRISPR/Cas9 Enhanced Tomato Resistance to Phytophthora infestans. Hong, Y. et al., 2021.*

⁸⁵ *Engineering Quantitative Trait Variation for Crop Improvement by Genome Editing. Rodríguez-Leal, D. et al., 2017.*

⁸⁶ *Tomato YABBY2b controls plant height through regulating indole-3-acetic acid-amido synthetase (GH3.8) expression. Sun M. et al., 2020.*

⁸⁷ *Bypassing Negative Epistasis on Yield in Tomato Imposed by a Domestication Gene. Soyk et al., 2017*

⁸⁸ *GABA-enriched tomato is first CRISPR-edited food to enter market. Waltz, E., 2021.*

⁸⁹ *Multiple gene substitution by Target-AID base-editing technology in tomato. Hunkitzer, J. et al., 2020.*

⁹⁰ *Targeted gene disruption coupled with metabolic screen approach to uncover the LEAFY COTYLEDON1-LIKE4 (L1L4) function in tomato fruit metabolism. Gago, C. et al., 2017.*

También es importante destacar que se han identificado genes cuya edición mejoran la vida postcosecha del tomate, evitando de esta forma el desperdicio alimentario y contribuyendo a una cadena de valor del tomate más sostenible⁹¹.

g. Potencial de mejora del pimiento

El pimiento (*Capsicum annuum*) es otro cultivo destacado en el campo agrícola español, donde España se posiciona como exportador neto de esta hortaliza. Aunque su importancia económica es significativa, es importante señalar que la investigación en edición genética para el pimiento ha recibido menos atención en comparación con el tomate. No obstante, existen oportunidades y potencial para ampliar los esfuerzos de investigación en este campo y aprovechar los beneficios que la edición genética puede ofrecer para mejorar variedades de pimiento en términos de resistencia a enfermedades, rendimiento, calidad y vida post-cosecha.

a. Resistencia del pimiento a condiciones climáticas y abióticas adversas

Hay grandes oportunidades para mejorar el rendimiento, la calidad de los frutos y la resistencia al estrés biótico en los cultivos de pimiento, mediante la edición genética. Estos avances son especialmente cruciales en el contexto del cambio climático, donde se busca mantener la productividad y asegurar la viabilidad de este cultivo especializado.

A pesar de estos avances, es necesario intensificar la investigación y desarrollar nuevos recursos para mejorar la capacidad de los pimientos de tolerar factores de estrés abiótico, como sequías, altas temperaturas y suelos salinos⁹². En este sentido, Un estudio reciente ha identificado el gen CaCIPK3 como un regulador positivo de la tolerancia a la sequía en los pimientos, destacando la importancia de la investigación genética en la mejora de estas características⁹³.

b. Resistencia a factores bióticos

La edición genética del pimiento ha logrado importantes avances en la resistencia a plagas y enfermedades, con investigaciones sobre la edición de genes que aumentan la resistencia a hongos y virus causantes de pérdidas significativas en la producción a nivel mundial. Un ejemplo de esto es un estudio donde se demuestra que, mediante la modificación de un gen concreto, el pimiento se vuelve más resistente a la antracnosis, enfermedad causada por un hongo de la familia *Colletotrichum*, cuyo manejo mediante métodos tradicionales no ha tenido un éxito notable⁹⁴. Estos ejemplos evidencian el compromiso y la relevancia de la investigación en la mejora genética del pimiento, brindando herramientas valiosas para proteger los cultivos y garantizar un suministro más seguro y productivo, aunque quede todavía un largo camino por delante.

h. Potencial de mejora del cultivo de la soja

El cultivo de la soja (*Glycine max*) es muy relevante para el contexto español, ya que el país tiene una gran dependencia exterior de este cultivo para la producción de piensos, industria en la

⁹¹ Application of CRISPR/Cas9 in Crop Quality Improvement, Cho Y-G, 2021.

⁹² Improving Vegetable Capsicums for Fruit Yield, Quality, and Tolerance to Biotic and Abiotic Stresses. Rathinasabapathi B., 2020.

⁹³ The CaCIPK3 gene positively regulates drought tolerance in pepper. Ma, X. et al., 2021.

⁹⁴ A single transcript CRISPR/Cas9 mediated mutagenesis of CaERF28 confers anthracnose resistance in chilli pepper (*Capsicum annuum* L.). Misha, R. et al., 2021.

España tiene un peso elevado a nivel europeo. En este contexto, lograr cultivos de soja altamente productivos y mejor adaptados al contexto español es de importancia para asegurar la continuidad de esta industria.

a. Resistencia de la soja a condiciones climáticas y abióticas adversas

La edición genética de la soja ha abierto nuevas posibilidades para **mejorar su resistencia a condiciones ambientales adversas, como la sequía y la salinidad**. Estos avances científicos se han logrado mediante la modificación precisa de los genes relacionados con la respuesta de la planta a estas situaciones estresantes. Dos investigaciones recientes han destacado los beneficios de la edición genética en la soja en relación con la resistencia a la sequía y la tolerancia a la salinidad.

En un estudio publicado en 2022, se hizo un experimento con una variedad de soja en la que se sobreexpresó un gen relacionado con la producción de proteínas de shock térmico. Los resultados mostraron que las plantas modificadas genéticamente exhibieron una mayor capacidad para sobrevivir y crecer en condiciones de sequía en comparación con las plantas no modificadas⁹⁵. Para un cultivo altamente dependiente del riego como la soja, y en condiciones de escasez hídrica como las que se sufren en el mediterráneo, la exploración de estos genes abre un gran potencial al cultivo de soja que permita mantener rendimientos con menores aportes hídricos.

Por otro lado, se realizó un estudio en 2021 para evaluar la tolerancia de la soja a la salinidad y cómo la edición genética podría contribuir a mejorarla. Mediante la manipulación de genes relacionados con la respuesta al estrés salino, se lograron desarrollar variedades de soja genéticamente modificadas que mostraron una mayor tolerancia a la salinidad. Estas plantas fueron capaces de mantener un crecimiento y desarrollo saludables incluso en suelos con altos niveles de sal⁹⁶.

b. Resistencia de la soja a plagas y enfermedades

La edición genética también ha abierto la puerta a la mejora de la resistencia de la soja frente a hongos, bacterias virus o plagas. Un ejemplo destacado es el de un estudio publicado en 2021, donde se logró una resistencia incrementada a *Phytophthora sojae*, patógeno que afecta a la soja a nivel mundial⁹⁷. Asimismo, diversas investigaciones también han logrado sojas resistentes a insectos que muerden las hojas de la planta, que suelen provocar pérdidas de rendimiento y problemas de calidad en sus semillas⁹⁸.

c. Mejora de las cualidades agronómicas de la soja

Dos áreas de investigación destacadas en la mejora de cualidades agronómicas de la soja se centran en el aumento del número de semillas por vaina y el control del tiempo de floración, ambos determinantes importantes para el rendimiento y adaptación de la soja.

En un estudio realizado en 2021, se exploró la mejora del número de semillas por vaina (NSPP, por sus siglas en inglés) mediante la edición genética. El equipo identificó genes relacionados

⁹⁵ Cloning and Drought Resistance Analysis of Soybean GmHsps_p23-like Gene. Zhang, Y. et al., 2022.

⁹⁶ Mutation of GmAIR Genes by CRISPR/Cas9 Genome Editing Results in Enhanced Salinity Stress Tolerance in Soybean. Wang, T. et al., 2021.

⁹⁷ A soybean NAC homolog contributes to resistance to *Phytophthora sojae* mediated by dirigent proteins. Guolong, Y. et al., 2022.

⁹⁸ CRISPR/Cas9-Mediated Targeted Mutagenesis of GmUGT Enhanced Soybean Resistance Against Leaf-Chewing Insects Through Flavonoids Biosynthesis. Zhang, Y. et al., 2022.

con la determinación del NSPP y los modificó en plantas de soja. Los resultados revelaron que las plantas genéticamente modificadas presentaron un aumento significativo en el NSPP en comparación con las plantas no modificadas. **Este aumento en el NSPP puede tener un impacto considerable en el rendimiento de la soja, ya que una mayor cantidad de semillas por vaina significa una mayor producción de granos**⁹⁹.

En otro estudio llevado en 2020, se investigó el control de la floración en la soja mediante la edición genética. La floración es un determinante crítico para el rendimiento y la adaptación de la soja, ya que influye en la sincronización de la polinización y la formación de vainas. Utilizando técnicas de edición genética, los investigadores lograron modificar genes involucrados en la regulación del tiempo de floración en las plantas de soja (concretamente, el gen LNK2). Como resultado, se observó un control más preciso del tiempo de floración, lo que podría permitir una mejor adaptación de la soja a diferentes condiciones ambientales y maximizar el rendimiento de la soja en terrenos de alta latitud¹⁰⁰.

d. Mejora de las propiedades organolépticas y la calidad nutricional de la soja

La soja editada genéticamente es otro de los cultivos que ya ha llegado al mercado, en este caso en EEUU de la mano de la empresa Calyxt. Esta empresa ha logrado producir soja con ácidos grasos de alto contenido oleico y con un 20% menos de ácidos grasos saturados en comparación con el aceite de soja convencional, mejorando el perfil nutricional de este alimento gracias a la mayor proporción de ácidos grasos saludables¹⁰¹.

i. Potencial de mejora del girasol

El girasol (*Helianthus annuus*) es un cultivo al alza en la agricultura española. Sin embargo, **hasta fechas recientes, no se habían desarrollado de forma efectiva herramientas para su edición genética**. No obstante, en 2023 se publicó un estudio que marcó un hito importante al presentar avances en la técnica de modificación genética del girasol, permitiendo su modificación de manera más eficaz y accesible para investigadores e industria.

Este estudio, disponible en el artículo "Advances in Efficient Genome Editing of Sunflower"¹⁰², describe una serie de desarrollos y descubrimientos relevantes en la modificación genética del girasol. Estos avances están destinados a mejorar tanto la calidad del cultivo como su resistencia a diversos factores de estrés. En este sentido, mediante la edición genética, se ha logrado, por ejemplo, desactivar un gen específico (FAD2-1), que permitiría **aumentar la producción de ácido oleico en el girasol, dando lugar a girasol con un perfil nutricional más atractivo**, ya que este tipo de ácido contribuye a reducir las lipoproteínas nocivas de baja densidad (LDL) y aumentar las proteínas beneficiosas de alta densidad (HDL)¹⁰³.

⁹⁹ CRISPR/Cas9-mediated gene editing of GmJAGGED1 increased yield in the low-latitude soybean variety Huachun 6. Zhandong, C. et al., 2021.

¹⁰⁰ Multiplex CRISPR/Cas9-mediated knockout of soybean LNK2 advances flowering time. Li, Z. et al., 2021.

¹⁰¹ High-oleic soybeans out of the lab, into the field. Gullickson, G., 2019.

¹⁰² Accelerated Breeding for *Helianthus annuus* (Sunflower) through Doubled Haploidy: An Insight on Past and Future Prospects in the Era of Genome Editing. Mabuza, L. et al., 2023.

¹⁰³ CRISPR/Cas9-mediated targeted mutagenesis of FAD2-1 gene for oleic acids composition in sunflower. Uslu, Y. Z. et al, 2022.

j. Potencial de mejora de lentejas y garbanzos

Las lentejas (*Lens culinaris*) y los garbanzos (*Cicer arietinum*), dos legumbres populares en la alimentación mediterránea han recibido relativamente poca atención en términos de mejoras genéticas y agrícolas en comparación con otros cultivos. Sin embargo, con el aumento en la demanda de cultivos ricos en proteínas, estas legumbres podrían desempeñar un papel cada vez más relevante en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola.

a. Resistencia de las legumbres a condiciones climáticas y abióticas adversas

En el caso de la lenteja, **el estrés por sequía es el principal estrés abiótico que causa efectos graves en su crecimiento y desarrollo. Por lo tanto, es imperativo establecer soluciones innovadoras y sostenibles para reducir los efectos adversos de la sequía en el cultivo de lentejas.** Un estudio reciente investigó sobre los posibles genes candidatos a ser editados genéticamente para mejorar su rendimiento en entornos propensos a la sequía, condición que, en general afecta la germinación, la fotosíntesis, las relaciones hídricas, el crecimiento de la parte aérea y las raíces de la lenteja, lo que reduce el rendimiento final¹⁰⁴.

Este hecho también ocurre en el garbanzo. En este caso, un estudio reciente analiza el progreso en las herramientas de edición del genoma y sus aplicaciones en el desarrollo de cultivos de garbanzo, las limitaciones científicas y las perspectivas futuras para la biofortificación de la citoquinina deshidrogenasa, la nitrato reductasa y la superóxido dismutasa **para inducir resistencia a la sequía, tolerancia al calor y mayor rendimiento en el garbanzo para enfrentar el cambio climático global, el hambre y las amenazas nutricionales**¹⁰⁵.

3.4. Conclusiones del potencial de la mejora vegetal y las nuevas técnicas de edición genómica

Como se ha evidenciado en los ejemplos anteriores, **la mejora vegetal y las innovadoras técnicas de edición genética poseen un vasto potencial para abordar los desafíos que plantea el suministro de alimentos.** Estas herramientas son indispensables para que los agricultores puedan adaptarse rápidamente a nuevas condiciones.

La semilla misma encierra toda la innovación desarrollada, lo que facilita su adopción por parte de los agricultores sin grandes costos adicionales. Al combinar estas técnicas con otras estrategias de adaptación, se puede maximizar la eficacia en la respuesta a los retos climáticos, ambientales y sociales del sector.

¹⁰⁴ Drought Stress in Lentil (*Lens culinaris*, Medik) and Approaches for Its Management. Zeroual, A. et al., 2023.

¹⁰⁵ Unclasp potentials of genomics and gene editing in chickpea to fight climate change and global hunger threat. Singh, S. et al. 2023.

4. Limitaciones con las que se encuentra la mejora

Es esencial dotar de herramientas para aumentar el potencial del sector agrícola a la hora de hacer frente a la escasez y los retos que tiene por delante. En este contexto, **la mejora vegetal y las nuevas técnicas genómicas desempeñarán un papel fundamental en la búsqueda de soluciones innovadoras para garantizar la seguridad alimentaria** y afrontar los desafíos globales del siglo XXI. No obstante, para el desarrollo de todo su potencial, específicamente en el contexto nacional y europeo, la mejora vegetal se topa con una serie de barreras e incertezas. Estas limitaciones, que van desde regulaciones restrictivas o poco claras, hasta la falta de eficiencia en las administraciones públicas, así como percepciones sesgadas por parte de la ciudadanía, plantean desafíos significativos que deben ser abordados de manera integral.

Existen una serie de barreras que impiden que la mejora vegetal alcance todo su potencial.

Estas barreras son de carácter normativo, administrativo y de aceptación social.

4.1. Tecnología y legislación: avance a ritmos diferentes

A nivel general, **los progresos tecnológicos suelen desarrollarse a un ritmo al que los marcos legales tardan en adaptarse**. En el caso de la mejora vegetal y las nuevas herramientas edición genética sucede lo mismo: a nivel global, distintos países han empezado a adaptar su legislación de forma diversa, generando resultados distintos en términos de aceptación y regulación de estas tecnologías alrededor del mundo.

a. Marcos legislativos no armonizados para una producción de alimentos global

Diferentes partes del mundo han adoptado marcos legislativos distintos para valorar y facilitar la innovación del sector de la mejora vegetal. En Argentina, uno de los primeros países en afrontar la edición genética para plantas en 2015, los legisladores **interpretaron que mientras que la edición genética no incluyese material genético externo, los cultivos obtenidos se clasificarían como no OMG** (organismos modificados genéticamente), mientras que, si la técnica involucra una nueva combinación de material genético mediante el uso de la biotecnología moderna, sí se clasificaría como OMG. La regulación argentina está construida sobre la definición de OMG que estableció el Protocolo de Cartagena, y la modificación posterior de la regulación estableció un procedimiento para que **caso por caso el mejorador presente a las autoridades el producto o la idea que quiere desarrollar, y las autoridades determinen si se trata de un OMG o un organismo convencional**. Es decir, aunque se regule la técnica concreta, se tiene en cuenta también el tipo de producto final obtenido.

Distintas regulaciones, distintas definiciones de edición genética y OMGs

La regulación de las plantas obtenidas mediante biotecnología moderna en mejora vegetal depende en gran medida de la consideración de si estas plantas entran en la definición de organismo modificado genéticamente (OMG) o no.

Una definición ampliamente adoptada de OMG se describe en el **Protocolo de Cartagena sobre Bioseguridad de la Biotecnología, donde los OMG se denominan 'organismos vivos modificados'** que significa 'cualquier organismo vivo que posee una nueva combinación de material genético obtenido mediante la aplicación de la biotecnología moderna'. Hasta hace poco, la distinción entre OMG y no OMG era relativamente sencilla, con la selección tradicional y el cruzamiento y mutagénesis no dirigida (como la química) produciendo cultivos no OMG.

No obstante, la edición genética desarrollada actualmente utiliza la biología molecular para realizar cambios precisos en el ADN de la planta, diseñados para introducir rasgos específicos de interés. Estos cambios pueden ir desde bases simples hasta la adición o eliminación de uno o más genes. Al respecto, atendiendo a la definición del Protocolo de Cartagena, decidir si una planta editada genéticamente es OMG está sujeto a interpretación: la tecnología de edición del genoma se asemeja a la "biotecnología moderna" tal como se define en el protocolo de Cartagena, lo que sugiere que su uso da lugar a cultivos transgénicos. **Sin embargo, los cambios genéticos que se introducen (cuando no involucran la introducción de material genético externo) pueden ser más similares a los enfoques de reproducción tradicionales, lo cual puede interpretarse como que dichos cultivos no son OMGs.**

Este hecho da como resultado que actualmente diferentes legislaciones interpretan de forma diferente los productos vegetales provenientes de edición genética, que, a su vez, pueden regularse de forma más o menos estricta, no solo dependiendo de si se consideran OMGs.

A partir de la regulación argentina, hay distintos países que han empezado a reconocer a las plantas editadas genéticamente (que no contienen ADN fuera del patrimonio genético del obtentor) como plantas equivalentes a aquellas producidas por mejora convencional, o equivalentes a OMGs pero con un proceso de aprobación simplificado, haciéndose una verificación caso por caso por parte de las autoridades correspondientes y teniendo en cuenta el producto final obtenido. Por ejemplo, en China, pese a que las técnicas de edición genética se consideran dentro de la normativa de OMGs, ya se han aprobado para comercializar cultivos editados genéticamente.

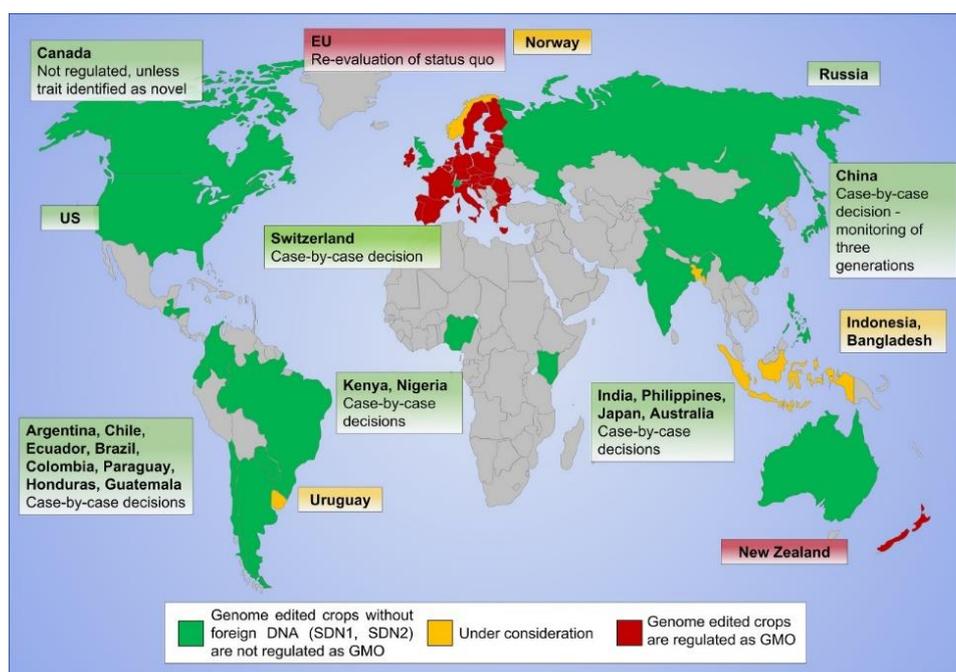
Distintos países han empezado a reconocer a las plantas editadas genéticamente (que no contienen ADN foráneo) como plantas equivalentes a aquellas producidas por mejora convencional, usando regulaciones que tienen en cuenta las características del producto final obtenido, y no tanto en la técnica empleada para su obtención.

No obstante, otras regiones, como Nueva Zelanda, consideran actualmente a las plantas editadas genéticamente como OMGs, para los que además la regulación existente es muy estricta, lo que impediría su uso a gran escala (ver siguiente figura)¹⁰⁶. En este sentido, **teniendo en cuenta que los alimentos forman parte de cadenas de valor globales, diferencias en los enfoques regulatorios puede tener consecuencias internacionales:** por un lado, dando lugar a

¹⁰⁶ GMO or non-GMO? That is the question. Salt, D.E., 2022.

ritmos de innovación muy distintos en diferentes partes del mundo, y por otro, **puede resultar difícil su detección al cruzar fronteras, debido a su semejanza con productos obtenidos a partir de mejora convencional**¹⁰⁷. En este sentido, **la detección de pequeños cambios introducidos mediante edición genética es difícil de diferenciar de cambios introducidos mediante la mejora tradicional**, hecho que no sucede con los transgénicos. Esto es debido a que es muy fácil detectar la presencia de genes externos al material genético de una planta, ya que contienen una firma única, pero no así pequeños cambios dirigidos a partes concretas del genoma: el hecho de que estos pequeños cambios introducidos mediante edición genética sean asimilables a los cambios y mutaciones que suceden de forma espontánea o mediante mejora convencional dificulta su diferenciación de la mejora tradicional, incluso pudiendo llegar a ser imposible de demostrar si un cambio concreto ha sido introducido mediante estas nuevas técnicas.

Figura 74. Marco regulatorio para la edición genética en plantas en 2022



Fuente: An increasing number of countries regulate genome editing in crops. Buchholzer, M. y Frommer, W.B., 2022.

b. El marco legal europeo: un futuro incierto para la innovación en mejora vegetal

Actualmente, en la Unión Europea, todos aquellos organismos diferentes a los que se obtienen por mejora tradicional (como cruzamientos o mutación espontánea) son **regulados por la Directiva 2001/18/CE y considerados OMGs**. Ésta se estableció para regular en su momento el uso de herramientas de transgénesis convencional. Por ello, la Directiva 2001/18/CE no tiene en cuenta ninguna de las nuevas técnicas genómicas desarrolladas posteriormente, y todos los organismos desarrollados con nuevas herramientas de edición genética caen en la definición de OMGs, independientemente de si el producto obtenido puede ser idéntico a los obtenidos mediante técnicas de mejora tradicional.

En este contexto, el Consejo Europeo solicitó a la Comisión Europea en noviembre de 2019 que proporcionara un estudio sobre las nuevas técnicas de edición genética desarrolladas en los últimos 20 años. El estudio, que fue publicado en 2021, concluyó que las normas actuales,

¹⁰⁷ Genome-edited crops and 21st century food system challenges. European Parliamentary Research Service, 2022.

principalmente la legislación existente sobre OMGs, van en contra del progreso científico y tecnológico y **no facilitan suficientemente el desarrollo y la comercialización de productos innovadores que pueden obtenerse a partir de edición genética mediante nuevas técnicas genómicas**. Quedó latente, de esta forma, que la UE necesitaba un marco adaptado para plantas editadas genéticamente que beneficien a los agricultores, los consumidores y el medio ambiente.

Como resultado, en julio de 2023 la Unión Europea publicó una nueva propuesta de Directiva para regular ciertos tipos de plantas obtenidas mediante edición genética¹⁰⁸, con el objetivo de adaptar la regulación a las condiciones actuales de avance científico. La propuesta abarca las plantas que contienen material genético de la misma planta (mutagénesis dirigida) o de plantas que pueden cruzarse entre sí (cisgénesis, incluida la intragénesis); las plantas transgénicas (que contienen material genético de especies que no pueden cruzarse) seguirán estando sujetas a la legislación de OMGs tal como está vigente hoy en día. Esta nueva regulación, describe dos categorías de plantas:

- **Categoría 1:** plantas que son comparables a variaciones que ocurren de forma natural y que usan genes que se encuentran en el patrimonio genético de los obtentores, que se define como la información genética en su totalidad disponible en una especie y en otras especies taxonómicas con las que puede cruzarse, incluso utilizando técnicas avanzadas como el rescate de embriones, la poliploidía inducida y el cruzamiento puente. Esta categoría requeriría notificación y registro.

Criterios de equivalencia entre vegetales obtenidos con NTG y vegetales convencionales (Cat. 1)

Un vegetal obtenido con NTG se considera equivalente a los vegetales convencionales cuando difiere del vegetal receptor/parental en no más de veinte modificaciones genéticas de los tipos mencionados en los puntos 1 a 5, en cualquier secuencia de ADN que comparta la similitud con el sitio destinatario que pueda predecirse mediante herramientas bioinformáticas:

- 1) *sustitución o inserción de un máximo de veinte nucleótidos;*
- 2) *supresión de cualquier cantidad de nucleótidos;*
- 3) *a condición de que la modificación genética no interrumpa un gen endógeno:*
 - a) *inserción dirigida de una secuencia contigua de ADN existente en el patrimonio genético del obtentor;*
 - b) *sustitución dirigida de una secuencia de ADN endógeno por una secuencia contigua de ADN existente en el patrimonio genético del obtentor;*
- 4) *inversión dirigida de una secuencia de cualquier cantidad de nucleótidos;*
- 5) *cualquier otra modificación dirigida de cualquier tamaño, a condición de que las secuencias de ADN resultantes ya se produzcan (posiblemente con modificaciones aceptadas en los puntos 1 o 2) en una especie del patrimonio genético de los obtentores.*

- **Categoría 2:** plantas con modificaciones más complejas no contempladas en la Categoría 1, que irían bajo el proceso más extensivo de regulación de OMGs (Directiva 2001/18/CE)

Las plantas de la **categoría 1**, pese a tener un proceso de notificación y registro distintivo, serían equiparadas a las plantas obtenidas mediante técnicas de mejora tradicionales. Con esta nueva propuesta, la Unión Europea espera incentivar el desarrollo de plantas que le permitan abordar los desafíos de sostenibilidad actuales, además de monitorizar de forma robusta los impactos económicos, ambientales y sociales de las plantas editadas genéticamente.

Asimismo, la legislación contempla incentivos para aquellos vegetales obtenidos mediante técnicas de edición genómica de categoría 2 cuando presentan rasgos pertinentes para la sostenibilidad, y no presenten resistencias a herbicidas concretos. Los incentivos se orientan a la obtención de vegetales por parte de PYMES.

Rasgos que justifican incentivos para el desarrollo de vegetales de categoría 2

- 1) *rendimiento, incluidos la estabilidad del rendimiento y el rendimiento en condiciones de bajos insumos;*
- 2) *tolerancia/resistencia a tensiones bióticas, como enfermedades de los vegetales causadas por nematodos, hongos, bacterias, virus y otras plagas;*
- 3) *tolerancia/resistencia a tensiones abióticas, como las creadas o exacerbadas por el cambio climático;*
- 4) *uso más eficiente de los recursos, como el agua y los nutrientes;*
- 5) *características que mejoren la sostenibilidad del almacenamiento, la transformación y la distribución;*
- 6) *mejora de la calidad o de las características nutricionales;*
- 7) *menor necesidad de insumos externos, como productos fitosanitarios y fertilizantes.*

El establecimiento de una nueva propuesta de directiva representa un **significativo avance en la regulación adecuada de las técnicas de edición genética más recientes**, en consonancia con los avances científicos. Sin embargo, **esta propuesta aún suscita incertidumbres en cuanto a su interpretación y la delimitación de su alcance**. Un punto de particular atención es el criterio que establece un límite de hasta 20 modificaciones genéticas. Esta disposición puede ser interpretada de diversas formas: ya sea como la restricción a un máximo de 20 mutaciones de nucleótidos en total, o permitiendo combinar diferentes tipos de edición genética hasta un máximo de 20 veces, siempre y cuando cada modificación no implique cambios en más de 20 nucleótidos consecutivos. Dependiendo de la interpretación adoptada, esta apertura parcial al uso de nuevas tecnologías de mejora vegetal podría resultar limitante, **en especial al considerar que un límite de 20 nucleótidos de cambio es inferior a los cambios permitidos en técnicas de mutagénesis no dirigida y mejora tradicional**. Además, este límite podría restringir la edición de características complejas y dependientes de múltiples genes, como, por ejemplo, el rendimiento del cultivo, limitando su aplicación a ediciones puntuales en genes específicos. Según la revista Science, el criterio de las 20 modificaciones se basa en un estudio de 2011 realizado en la planta modelo *Arabidopsis*, en el cual las variaciones genéticas naturales detectables entre individuos se limitaron a dicho tamaño¹⁰⁹.

No obstante, la regulación propuesta presenta un aspecto positivo, ya que **permite la incorporación o traslado de genes dentro del patrimonio genético del obtentor, siempre que provengan de especies cuyo cruce sea compatible**. Esta flexibilidad resulta atractiva debido a que la capacidad de mover genes puede dar lugar a efectos más sofisticados, como cambios en los patrones de expresión genética, en lugar de simplemente eliminar un gen. En este sentido, la propuesta abre posibilidades para el desarrollo de mejoras vegetales más precisas y adaptadas a las necesidades agrícolas y alimentarias del futuro.

Otra de las limitaciones a las nuevas técnicas genómicas, es que, pese a que las plantas obtenidas mediante ellas se consideran equivalentes a las variedades obtenidas mediante mejora tradicional, es que estas no se permiten en el cultivo orgánico. En un horizonte donde la UE

¹⁰⁹ European Commission proposes loosening rules for gene-edited plants. Stokstad E., 2023

espera que un 25% de su superficie sea cultivada en orgánico, no poder cosechar variedades con mejor adaptación al cambio climático, y diversos factores, supone claramente un riesgo para la seguridad alimentaria en Europa.

c. La necesidad de una evaluación de riesgos coherente

En este contexto, **es crucial garantizar un análisis de riesgos coherente y equivalente para productos idénticos que se hayan obtenido por diferentes métodos de mejora**. Varios países defienden que estas técnicas deberían regularse como los métodos convencionales, argumentando que no existe justificación para regular de manera diferente a productos idénticos: la adopción de una legislación específica con requisitos muy estrictos para la evaluación de las nuevas variedades obtenidas mediante edición genética implicaría que los productos obtenidos mediante estas herramientas siempre deban pasar por un largo proceso para ser autorizados o notificados antes de su comercialización. Por otro lado, los productos idénticos, pero desarrollados a través de métodos de mejora clásica, solo requerirían un registro de acuerdo con la normativa existente para semillas y material de reproducción vegetal.

Asimismo, en el contexto de la Unión Europea, en 2022 la EFSA hizo una reevaluación de las nuevas técnicas de edición genética¹¹⁰ y consideró que las plantas producidas por nuevas técnicas de edición genética como la mutagénesis dirigida, cisgénesis e intragénesis en algunos casos **no presentan nuevos peligros en comparación con las plantas producidas con métodos clásicos de mutagénesis o técnicas de cultivo convencionales**. La EFSA señaló que algunas plantas producidas con estas técnicas pueden experimentar pequeños cambios que también podrían ocurrir en la naturaleza o mediante la reproducción convencional.

En este contexto, la propuesta de la Comisión, basándose en las conclusiones de la EFSA, la propone que las plantas que sean comparables a las plantas convencionales (según los criterios definidos en la propuesta) sean tratadas de la misma manera y no estén sujetas a una evaluación de riesgos adicional. Sin embargo, las plantas con combinaciones complejas de mutaciones seguirán estando sujetas a una evaluación de riesgos y deberán ser autorizadas antes de poder ser comercializadas. No obstante, **como se ha indicado anteriormente, el criterio (sujeto a interpretación) de la limitación del uso a 20 modificaciones genéticas, no responde a ningún criterio científico concreto, sobre el que una planta con 21 modificaciones genéticas tenga más riesgo que una que contenga 19 modificaciones**.

En este contexto, cabe destacar que hay una **disparidad importante entre la aceptación y la regulación de OMGs y técnicas de edición genética en diferentes áreas tecnológicas**: por ejemplo, su uso está tiene una aceptación más generalizada para la biomedicina y el tratamiento de enfermedades.

Figura 75. Portada de noticia sobre el uso de CRISPR en el tratamiento de enfermedades.

Patrick Hsu: “La edición genética ya cura pacientes en fase clínica, y es probable que haya tratamientos CRISPR en un año”

Este biólogo es uno de los investigadores punteros en el mundo en las conocidas como tijeras moleculares, una incipiente herramienta de edición genética que ha despertado grandes expectativas en el tratamiento de ciertas enfermedades

— Edición genética: aprendiendo a usar las tijeras moleculares

Fuente: eldiario.es

¹¹⁰ *Criteria for risk assessment of plants produced by targeted mutagenesis, cisgenesis and intragenesis. EFSA, 2022.*

4.2. Falta de recursos públicos para la evaluación de nuevas variedades

Más allá de las limitaciones evidentes en el marco regulatorio, otro obstáculo significativo para la innovación en el campo de la mejora vegetal se encuentra en la **disponibilidad de recursos por parte de las administraciones públicas para realizar las evaluaciones pertinentes antes de lanzar las nuevas variedades al mercado**. A medida que las semillas avanzan en su proceso de evaluación, especialmente en lo que respecta al movimiento de semillas, se vuelve evidente que las empresas a menudo se enfrentan a la falta de recursos necesarios por parte de la administración (tanto financieros como de personal) para llevar a cabo estas evaluaciones. Esto crea un cuello de botella que restringe la capacidad de innovación en este ámbito.

Resulta necesario que las diferentes administraciones destinen los recursos económicos y humanos necesarios para las tareas de evaluación y aprobación de nuevas variedades, así como agilizar los diferentes procesos administrativos existentes para dar una respuesta más rápida y eficiente a las demandas de la industria de mejora vegetal.

Es fundamental reconocer esta disparidad y buscar soluciones para superarla. Esto implica **asignar los recursos financieros y humanos necesarios a las tareas de evaluación y aprobación de variedades**, así como agilizar los procesos administrativos para asegurar una respuesta más rápida y eficiente a las demandas de la industria de mejora vegetal. Además, es esencial fomentar una estrecha colaboración entre las empresas y las administraciones, promoviendo una comunicación fluida y un intercambio de conocimientos que impulse la innovación de manera conjunta.

Cabe destacar, en el contexto actual de la Unión Europea, la propuesta de Reglamento sobre material de reproducción vegetal. Este nuevo reglamento sustituirá a 10 directivas y permite armonizar y consolidar el marco legislativo existente para el registro y certificación de variedades. No obstante, **con la inclusión de nuevos requisitos de sostenibilidad más estrictos para aprobar nuevas variedades¹¹¹**, pese a incentivar el desarrollo de variedades que permitan dar respuesta a los desafíos actuales de la agricultura, se aumentará la carga de trabajo para el registro y la certificación de variedades, **entorpeciendo el proceso de llevar nuevas variedades al mercado si no se dotan de más medios para evaluarlas**.

4.3. Falta de reconocimiento por parte de los consumidores y percepciones sesgadas

En el ámbito de la mejora vegetal, es crucial abordar y corregir ciertas percepciones erróneas por parte del público en general, que pueden limitar su avance, desarrollo y puesta en el mercado.

En primer lugar, es **necesario aclarar la equiparación incorrecta que a menudo se hace entre los cultivos transgénicos y la edición génica**. Esto queda muy presente en los comentarios realizados en la propuesta legislativa de la Unión Europea sobre nuevas técnicas de edición genética, donde multitud de asociaciones y ciudadanos equiparan los productos obtenidos mediante ambas técnicas, insistiendo en seguir aplicando la regulación existente sin adaptarla

¹¹¹ Remarks by Commissioner Stella Kyriakides at the Agrifish Council - Plant and Forest Reproductive Material, 2022.

al progreso científico realizado en los últimos 20 años. Aunque ambos se refieren a la modificación genética de las plantas, existen diferencias significativas entre ellos, tal y como se ha mencionado anteriormente. **Es fundamental reconocer que la edición génica ofrece nuevas oportunidades para la mejora vegetal sin recurrir a la inserción de genes exógenos.** Esta distinción es de suma importancia para una comprensión precisa y objetiva de las herramientas disponibles y sus implicaciones éticas, regulatorias y de seguridad, superando la actual animadversión hacia cualquier avance tecnológico enfocado a la mejora genética vegetal.

En segundo lugar, es **imprescindible reconocer y valorar la participación de las instituciones públicas en la mejora vegetal.** A pesar de que las grandes empresas desempeñan un papel destacado en la innovación en este campo, no se puede ignorar la contribución significativa de los grupos de investigación y las instituciones académicas. A nivel nacional, existen numerosos grupos de investigación públicos que han dedicado años de trabajo al desarrollo y aplicación de tecnologías como CRISPR, con un enfoque particular en el mejoramiento de las especies vegetales adaptadas a las condiciones locales, que instan también por la mejora de la regulación existente para facilitar su uso. Estos grupos generan conocimientos de vanguardia y sus investigaciones pueden ser aprovechadas para **impulsar la mejora vegetal y abordar los desafíos agrícolas y medioambientales, adaptados a nuestro contexto y necesidades locales.**

Asimismo, en aquellos países donde las tecnologías de edición génica de plantas están reguladas y se permite el desarrollo de alimentos usando estas técnicas, hay una **creciente participación de pequeñas y medianas empresas y startups en el ámbito de la mejora vegetal.** Estas empresas emergentes están liderando la comercialización de variedades vegetales mejoradas utilizando técnicas de edición génica. En este sentido, un aspecto destacado de la contribución de las tecnologías de edición genética es el potencial de **ofrecer precios más accesibles en comparación con los enfoques tradicionales de mejora vegetal.** Esta democratización de la mejora vegetal abre nuevas oportunidades para la diversidad y la competencia en el mercado, estimulando la innovación y proporcionando soluciones adaptadas a las necesidades específicas de diferentes regiones y sistemas agrícolas. Asimismo, la nueva propuesta de Directiva para la regulación de las nuevas técnicas de edición genética pretende reducir los trámites y costes burocráticos para empresas y PYMES, además de poner a su disposición asesoramiento científico.

En conclusión, es imperativo superar las equiparaciones inexactas, valorar el trabajo de las instituciones públicas y reconocer el papel cada vez más relevante de las pymes y startups en el campo de la mejora vegetal mediante la edición génica. **Al hacerlo, se fomentará una comprensión más precisa y equilibrada de las diversas fuerzas impulsoras de la innovación en este campo.** Además, se promoverá un entorno más colaborativo y propicio para el desarrollo y la adopción de variedades vegetales mejoradas, con el potencial de abordar los desafíos globales y locales relacionados con la seguridad alimentaria, la sostenibilidad agrícola y el cambio climático.

5. Principales conclusiones

El suministro de alimentos a precios asequibles no se encuentra garantizado a medio plazo, siendo necesario abordar los retos a los que se enfrentan los sistemas alimentarios, tanto a escala global, como española, de manera que se puedan configurar soluciones que permitan abastecer a la población en escenarios futuros inciertos.

Entre los retos a los que deben hacer frente los sistemas alimentarios se encuentran desafíos de carácter estructural y de carácter coyuntural.

Entre los desafíos de carácter estructural destacan:

- **Alimentar a una población creciente:**
 - Se espera que la población mundial llegue a 9.700 millones en 2050.
 - **Las últimas estimaciones de la FAO indican que la producción de alimentos debería aumentar entre un 35% y un 50% para 2050.**
 - El incremento de la necesidad de alimentos no se debe únicamente a una mayor ingesta, sino también a la variación de la procedencia de las kilocalorías consumidas.
 - El incremento de la demanda a nivel mundial, a no ser que se incremente la producción de alimentos, **supondría un incremento a escala global de precios, que también afectaría a España.**
 - Para hacer frente al actual crecimiento poblacional, el mundo **deberá impulsar una nueva revolución agrícola** que, necesariamente, deberá ser más acelerada que la observada entre los siglos XVIII y XIX.
 - La magnitud del reto existente hace que **no se pueda hacer frente al mismo sin un incremento de las productividades** de los diferentes cultivos.
- **Imposibilidad de incrementar las tierras de cultivo:**
 - Dado los impactos asociados a la deforestación, a los compromisos adquiridos para acabar con la misma a nivel mundial, y atendiendo a que los pastos y campos de cultivo ya suponen un 50% de la superficie terrestre, **la respuesta a las necesidades crecientes de alimentos no podrá desarrollarse mediante la ampliación de las tierras agrícolas.**
- **Hacer frente al cambio climático:**
 - El impacto del cambio climático se seguirá produciendo, con mayor o menor intensidad, en años venideros.
 - Se prevé que, como consecuencia del cambio climático, **el rendimiento global de los cultivos a nivel mundial descienda entre un 3% y un 12%** a mediados de siglo, y entre un 11% y un 25% para finales de siglo.
- **La transición hacia sistemas de cultivo más sostenibles:**
 - Dado el potencial impacto negativo de la agricultura sobre los ecosistemas, resulta necesario reducir la utilización de insumos y adoptar técnicas que permitan la sostenibilidad de los agrosistemas a largo plazo.
 - La aplicación de la Estrategia Farm to Fork permitirá reducir los impactos ambientales asociados al sistema agroalimentario. No obstante, la aplicación de la misma, **sin medidas adicionales, supondría una reducción de los rendimientos agrícolas de entre un 5% y un 15%.**
 - Como consecuencia del decremento de la producción, se prevé un **aumento de los costes para los agricultores**, que se acabará traduciendo en una reducción

- de ingresos para los mismos y en un **incremento de precios para los consumidores**.
- En caso de no tomarse medidas adicionales, la implementación de las Estrategias F2F y de Biodiversidad, acabarían produciendo un **incremento en 20 millones de personas de la población en situación de inseguridad alimentaria** a nivel mundial.
 - **El incremento de coste de los insumos agrarios:**
 - La agricultura también se enfrenta a la necesidad de reducir los inputs de los cultivos por motivos de carácter económico, asociados al progresivo incremento del coste de las materias primas empleadas.
 - **La necesidad de garantizar la sostenibilidad económica de la producción agrícola:**
 - Resulta necesario que las medidas adoptadas para hacer frente al resto de retos vengan acompañadas de instrumentos que permitan garantizar la competitividad de los cultivos y de las zonas donde se producen, de lo contrario se podría asistir a la pérdida de sectores económicos y de forma asociada, a dinámicas de despoblación de las zonas productoras.

Como se ha comentado, a estos retos de carácter estructural, se añaden desafíos de carácter coyuntural asociados al escenario actual de crisis episódicas, continuadas y superpuestas (COVID-19, guerra de Ucrania...). Pese a sus ventajas, la globalización también hace a la producción agraria susceptible de ser afectada por disrupciones que emergen en el ámbito internacional, especialmente cuando alguna de las zonas “granero” del mundo se ven afectadas por crisis climáticas, geopolíticas, etc.

Estas crisis ya no son hechos aislados, sino que pueden formar parte de una nueva normalidad en el mundo, con una especial incidencia en las cadenas agroalimentarias a escala mundial. Por este motivo, resulta necesario no incrementar los niveles de dependencia del sistema alimentario español, especialmente de algunos productos de carácter básico.

Como consecuencia de la combinación de los diferentes desafíos a los que debe hacer frente la agricultura, **en 2050 será necesario incrementar, en promedio y a escala europea, un 60% los rendimientos de los cultivos respecto a la situación actual.**

Para producir más con menos recursos en un escenario de cambio climático, el paradigma agrícola *business as usual* queda obsoleto, **siendo necesaria una nueva revolución agrícola que permita intensificar de forma sostenible la agricultura y adaptar los cultivos a los nuevos escenarios climáticos.**

El incremento del rendimiento de los cultivos en los próximos años no podrá basarse tanto en la tecnificación agrícola, dada la necesidad de reducir los inputs agrícolas. Por este motivo, la actividad del sector obtentor se configura como una herramienta clave: **el papel de la mejora vegetal deberá ser necesariamente superior al observado en el pasado.** Para alcanzar los objetivos, **el ritmo de innovación en mejora vegetal hasta el 2050 deberá ser un 60% más acelerado que el observado en las tres décadas anteriores.**

Las nuevas técnicas de edición genética permiten mejorar las características de las plantas de manera más eficiente y con mayor precisión que los métodos tradicionales de mejoramiento genético. Mediante el empleo de estas técnicas, el tiempo necesario para la obtención de nuevas variedades se reduce a la mitad, pasándose de los 8-10 años actuales a 4-6 años, lo que **permitiría cumplir con los incrementos de rendimientos de los cultivos necesarios.**

No obstante, existen una serie de barreras que impiden que la mejora vegetal alcance todo su potencial. Estas barreras son de carácter normativo, administrativo y de aceptación social.

- **Barreras de carácter normativo:**

- A diferencia de lo que ocurre en otros países, la normativa europea considera actualmente a las plantas editadas genéticamente como organismos genéticamente modificados, estando sujetas a estrictas regulaciones, que, de no modificarse, impedirán el desarrollo de estas técnicas y de nuevas variedades en la UE.
- A la espera de que llegue a aprobarse la nueva directiva que intenta adaptarse al progreso tecnológico, **puede perderse el tren de la innovación** en relación a nuevas variedades vegetales, pasándose a concentrar la innovación más puntera a escala mundial en países donde la regulación sí permite la utilización de técnicas de edición.
- De acuerdo con la Estrategia Farm to Fork de la UE, las nuevas técnicas innovadoras, incluida la biotecnología y el desarrollo de productos de base biológica, pueden desempeñar un papel en el aumento de la sostenibilidad, siempre que sean seguras para los consumidores y el medio ambiente y, al mismo tiempo, aporten beneficios a la sociedad en su conjunto. No obstante, **la regulación, a la espera de la aprobación de la nueva directiva sobre técnicas genéticas, no es proporcional a los riesgos que suponen las nuevas técnicas de edición, lo que impide el desarrollo de todo su potencial en apoyo de la consecución de los objetivos de la Estrategia.**
- No utilizar estas técnicas a escala europea **impedirá alcanzar los incrementos de rendimiento necesarios para garantizar la seguridad alimentaria, atemperar el alza de precios de los alimentos y asegurar la competitividad de tejidos agroindustriales en los que España actualmente es puntera.**
- Asimismo, se puede acabar dando la paradoja que se acabe consumiendo en la UE productos producidos en otras partes del mundo con variedades editadas genéticamente, cuyo cultivo actualmente se encuentra prohibido a escala comunitaria.

- **Falta de recursos públicos para la evaluación de nuevas variedades:**

- Resulta necesario que las diferentes administraciones **destinen los recursos económicos y humanos necesarios para las tareas de evaluación y aprobación de nuevas variedades**, así como agilizar los diferentes procesos administrativos existentes para dar una respuesta más rápida y eficiente a las demandas de la industria de mejora vegetal.

- **Falta de reconocimiento por parte de los consumidores y percepciones sesgadas:**

- Es necesario **aclarar la equiparación incorrecta que a menudo se hace entre los cultivos transgénicos y la edición génica.** Aunque ambos conceptos se refieren a la modificación genética de las plantas, existen diferencias significativas entre

ellos. Es fundamental reconocer que la edición génica **ofrece nuevas oportunidades para la mejora vegetal sin recurrir a la inserción de genes exógenos**. Esta distinción es de suma importancia para una comprensión precisa y objetiva de las herramientas disponibles y sus implicaciones éticas, regulatorias y de seguridad, superando la actual animadversión hacia cualquier avance tecnológico enfocado a la mejora genética vegetal

Como conclusión final, o se consigue que la actividad obtentora alcance todo su potencial, o no podrá garantizarse la seguridad alimentaria, lo que conllevará tener que hacer frente a un incremento de los gastos en alimentación, a posibles roturas en el suministro de determinados productos, especialmente para aquella población más desfavorecida, y al riesgo de desaparición de sectores económicos, que más allá de su aportación al PIB, han permitido fijar población en entornos rurales que, de lo contrario, habrían tenido y tendrán que hacer frente a dinámicas de abandono rural.

