

Los desafíos de la agricultura global

Fernando Andrade



INTA || Ediciones

Colección
DIVULGACIÓN

Los desafíos de la agricultura global

Fernando H. Andrade



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina

INTA Ediciones
2020

Andrade, Fernando H.

Los desafíos de la agricultura global / Fernando H. Andrade; prólogo de Fernando H. Andrade. - 1a ed ampliada. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Ediciones INTA, 2020.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-8333-68-7

1. Impacto Ambiental. 2. Agricultura. I. Título.

CDD 630.1

Este documento es resultado del financiamiento otorgado por el Estado Nacional, por lo tanto, queda sujeto al cumplimiento de la Ley N° 26.899.

Diseño:

Área de Comunicación Visual

Gerencia de Comunicación Institucional

Este libro

cuenta con licencia:



DEL AUTOR

Fernando H. Andrade es investigador y profesional consultor de INTA, investigador principal de CONICET, profesor titular de Ecofisiología de Cultivos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata (FCA UNMP).

Se graduó de ingeniero agrónomo en el año 1980 en la Facultad de Agronomía de la UBA, y posteriormente, realizó sus estudios de Magíster Scientiae y PhD en Iowa State University (EE. UU.).

Su área de interés es el estudio de las bases ecofisiológicas determinantes del crecimiento y rendimiento de los cultivos. Desde 1985 se ha dedicado a la docencia y a la investigación. Ha sido director de estudiantes de postgrado (magister y doctorado), muchos de los cuales son hoy reconocidos referentes en sus especialidades. Ha publicado alrededor de 120 trabajos científicos en revistas de prestigio internacional y ha escrito 5 libros. Tiene también una nutrida actividad de extensión y transferencia de conocimientos al medio productivo a través de publicaciones de difusión, conferencias, jornadas de campo, talleres, etc.

Durante su carrera ha sido distinguido con premios y reconocimientos entre los cuales se destacan los premios Weber (1984), Lobo de mar (2000), Konex (2003), Alfonsina (2007), Clarín Rural (2008), Antonio Pires de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria (2010), Colegio de Ing. Agr. de Buenos Aires (2018), Don Mario (2019), Houssay Trayectoria (2020) e Investigador de la Nación (2020). Es además Miembro correspondiente de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria (2012) y profesional consulto del INTA (desde 2014), y fue jurado de los premios Konex Ciencia y la Tecnología, edición 2013. Fue coordinador nacional del Área Estratégica Ecofisiología Vegetal del INTA (2005-2012) y coordinador nacional de la Red de Ecofisiología Vegetal de la misma institución (2012-2014). Ejerciendo estas funciones contribuyó a la conformación de grupos de investigación en Ecofisiología de cultivos en distintas regiones del país.

ÍNDICE

7 ● PRÓLOGO

9 ● 1. INTRODUCCIÓN

12 ● 2. EL PASADO

- 12 2.1. El principio
- 14 2.2. El *Homo sapiens*, las migraciones
- 18 2.3. El origen de la agricultura
- 21 2.4. La Edad Media
- 23 2.5. El Renacimiento
- 26 2.6. La Revolución Agrícola y la Revolución Industrial
- 28 2.7. La Revolución Verde y la actualidad
- 38 2.8. Síntesis

39 ● 3. IMPACTO AMBIENTAL DE LA AGRICULTURA

- 41 3.1. Calentamiento global y cambio climático
- 46 3.2. Pérdida de biodiversidad
- 49 3.3. Uso del agua
- 53 3.4. Contaminación química
 - 54 3.4.1. Plaguicidas
 - 57 3.4.2. Alteración del ciclo de los nutrientes
- 59 3.5. Degradación de los suelos
- 63 3.6. Producción de residuos y desechos
- 64 3.7. Resumen

65 ● 4. LAS FUTURAS DEMANDAS DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS

- 66 4.1. Crecimiento poblacional
- 69 4.2. Calidad de la dieta
- 73 4.3. Biocombustibles, biomateriales
- 77 4.4. Estimaciones sobre las futuras demandas de productos agrícolas

82 ● 5. ESTRATEGIAS PARA SATISFACER FUTURAS DEMANDAS

- 82 5.1. Reducir demandas
 - 82 5.1.1. Moderar dietas
 - 86 5.1.2. Reducir pérdidas y desperdicios
 - 89 5.1.3. Tasa de fecundidad
 - 89 5.1.4. Síntesis

90	5.2 Aumentar la producción agrícola
92	5.2.1. Superficie cultivada
99	5.2.2. Intensificación en el uso de la tierra
99	5.2.2.1. Rendimiento por unidad de superficie
102	5.2.2.2. Rendimiento potencial y cierre de brechas
106	5.2.2.3. Tecnologías de insumos
109	5.2.2.4. Intensificación sostenible
112	Mejoramiento genético
117	Biotecnología
119	Manejo de cultivos con base ecofisiológica
124	Buenas prácticas en el uso de agua y fertilizantes
128	Buenas prácticas en producción animal
129	Manejo integrado de plagas
133	Intensificación de la secuencia
137	Producciones ecológicas
141	5.2.3. Síntesis sobre estrategias para una producción sostenible
144	6. LOS DESAFÍOS. INTEGRACIÓN A NIVEL DE LOS CONTINENTES
145	6.1. Satisfacer las futuras demandas de productos agrícolas
145	6.1.1. Oferta de productos agrícolas
151	6.1.2. Moderar demandas
157	6.1.3. Síntesis
159	6.2. Reducir el impacto ambiental
159	6.2.1. La agricultura y las metas ambientales
169	6.2.2. Las actividades humanas y sus efectos ambientales
178	6.2.3. Integración y síntesis
180	6.3. La pobreza
180	6.3.1. Los ingresos y el desarrollo humano
182	6.3.2. Los ingresos y el consumo
184	6.3.3. Desarrollo humano, consumo e ingresos
185	6.3.4. La distribución de los ingresos y la inequidad
188	6.3.5. Pobreza y desnutrición
190	6.3.6. Los progresos
191	6.3.7. Causas de la pobreza
194	6.3.8. Nuevos indicadores y objetivos de desarrollo social
195	6.3.9. Síntesis
197	7. INNOVAR Y COLABORAR
205	8. ESCENARIOS POSIBLES
209	9. RESUMEN Y CONCLUSIONES
213	10. REFERENCIAS

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento a i) Roberto Fernández, José Andrade y Víctor Sadras por valiosos aportes en discusiones, datos y correcciones, ii) Marcelo Oviedo; Fernando García, Roberto Cittadini, Hugo Ojeda, Alfredo Cirilo, Pedro Laterra, Pablo Peri y Héctor Fernández por sus acertados comentarios, iii) Lucas Bonelli y Fernando Aramburu Merlos por su ayuda en la elaboración de las figuras, iv) Nicolás Andrade por su trabajo de corrección de redacción y v) Laura Lima y Gustavo Ciuffo por su trabajo de edición y a Verónica Durán por el diseño y diagramación.

PRÓLOGO

Esta segunda edición es una ampliación de la anterior. Toma de la primera los temas relacionados con las innovaciones del pasado y los escenarios futuros y agrega una actualización bibliográfica, una descripción más detallada de los impactos ambientales de la agricultura, nuevas estimaciones de las futuras demandas de alimentos, y un análisis de las estrategias a las que podemos recurrir para satisfacerlas a nivel de cada continente. Pasados 10 años desde los momentos bases para las proyecciones a las que se hace referencia en la 1.^a edición, se realiza un análisis de la adecuación de las estimaciones a juzgar por los datos productivos y ambientales actuales.

Se añaden, además, nuevas discusiones y elaboraciones acerca de los desafíos que enfrentamos en cuanto a romper la asociación entre producir y degradar, y a erradicar la pobreza. Entre las estrategias para implementar se consideran principalmente las basadas en tecnologías de procesos y de conocimientos que tienden a mayor producción, mayor productividad de recursos e insumos disponibles y menor impacto ambiental.

Una mirada sobre el pasado puede ayudarnos a comprender nuestro potencial creativo y a motivarnos para enfrentar los problemas que se nos presentan. Una mirada prospectiva nos ayuda a dimensionar la tarea que es necesario encarar y a identificar las vías para encontrar soluciones. Nuestras capacidades innatas de innovación y cooperación deberán cumplir un rol fundamental en alcanzar los objetivos de satisfacer la demanda futura de alimentos, cuidar el ambiente y erradicar la pobreza. Es mi deseo que este libro pueda realizar alguna contribución en pos de proteger y fomentar la innovación y promover la colaboración.

En los últimos años he participado en muchos debates sobre temas relacionados con la agricultura sostenible. He notado, en muchos casos, que la falta de información debilita la discusión y dificulta el avance. Es mi intención aportar conocimientos derivados de trabajos científicos y de bases de datos de fuentes reconocidas que pueda contribuir al sustento de las argumentaciones y a una discusión más fructífera.

Este trabajo fue escrito pensando en los productores agropecuarios, por su rol en la producción de alimentos para la población mundial que continúa creciendo y demandando productos de mayor calidad, y por su responsabilidad en alcanzar una producción sostenible. Sea este trabajo una muestra de mi respeto por todos lo que se dedican a esta digna tarea, y un humilde aporte ante el gran desafío que enfrentan.

El trabajo está dirigido, además, a los alumnos de escuelas y facultades de agronomía con el deseo de reforzar su entusiasmo por

aprender y contribuir a la generación de conocimientos, pilares para una agricultura sostenible; a las personas que levantan banderas de compromiso social y ambiental, con la intención de aportarles información detallada y actualizada; y también al público en general, con el propósito de concientizarlo acerca de la necesidad de moderar el consumo de alimentos, bienes y servicios, cuidar el ambiente y solidarizarnos con los que más sufren.

Finalmente, dedico este trabajo a mi esposa Mercedes y a mis hijos; a mis padres, Marta y Hugo, que formularon las primeras preguntas; a mis maestros y profesores que motivaron inquietudes; y a mis estudiantes, recurrente fuente de entusiasmo.

Fernando H. Andrade
Noviembre de 2020

1. INTRODUCCIÓN

El mundo está acuciado por problemas demográficos, de provisión de alimentos, agua y energía, de degradación ambiental y cambio climático, y de pobreza y marginalidad. Las predicciones sobre el futuro son inciertas por lo limitado de nuestro conocimiento y por la naturaleza de las innovaciones. No obstante, una mirada sobre nuestro pasado puede ayudarnos a plantear escenarios futuros y motivarnos para solucionar los problemas que enfrentamos.

Los principales objetivos de este trabajo son i) enfatizar logros de nuestra especie en materia de creatividad e innovación, especialmente aquellos relacionados con la producción de alimentos, ii) estimar la futura demanda de productos agrícolas y las posibilidades de satisfacerla de manera sostenible recurriendo a dichas capacidades, iii) analizar la evolución de la pobreza y de indicadores de desarrollo social.

La creatividad es la facultad de crear o inventar algo nuevo o de relacionar conceptos conocidos de manera novedosa apartándose de nociones y estructuras de pensamiento habituales. La innovación se entiende como la generación de ideas e invenciones y su utilización posterior a través de una aplicación de utilidad para la sociedad. Estas cualidades, junto con la capacidad de colaboración, son inherentes a nuestra especie y como tales jugaron un rol fundamental en la evolución de la humanidad y son insoslayables en el análisis de los desafíos que hoy enfrentamos.

En este libro, se presenta y discute información sobre los albores del género *Homo*, la dispersión de nuestra especie por el mundo, el origen de la agricultura, la instalación del método científico y las innovaciones en tecnología agrícola, energía y comunicaciones del pasado. Entre aquellas relacionadas con la producción agrícola se destacan la revolución neolítica, las primeras investigaciones sobre el funcionamiento de las plantas, la revolución agrícola y la revolución verde.

A lo largo del texto, se toma a la agricultura como la ciencia de cultivar plantas y criar animales para proveer alimentos, fibras y otros productos. Los logros de la agricultura a lo largo de los siglos han sido prodigiosos y dignos de ser reconocidos. Las innovaciones relacionadas con esta actividad posibilitaron satisfacer en gran medida las crecientes necesidades de alimentos de la humanidad, aun cuando las tasas de crecimiento poblacional fueron muy altas. Una población bien alimentada es el primer requisito para el bienestar humano. No obstante, los aumentos de producción estuvieron asociados con degradación del ambiente. El pre-

sente trabajo se focaliza en generar conciencia acerca de la necesidad de romper esta asociación, o sea, de satisfacer las futuras demandas de productos agrícolas, reduciendo a la vez el impacto ambiental. La producción de alimentos es, entonces, un tema central para la salud de la población y del ambiente. La discusión toma como supuesto garantizar bienestar e ingresos adecuados para los agricultores.

Este escrito hace hincapié sobre la relación entre el ser humano y el ambiente, listando y evaluando los efectos de las actividades humanas y, especialmente, de la agricultura sobre la degradación de los suelos, las emisiones de gases de efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad, el uso del agua, y la contaminación química. Detalla además, la evolución de la población humana por ser un factor que tracciona los incrementos de producción y que se asocia con el daño ambiental.

Presenta también una estimación de la futura demanda de productos agrícolas impulsada principalmente por el crecimiento poblacional y el cambio de la dieta, examinando además el posible impacto que tienen la morigeración de las dietas y la reducción de las pérdidas y desperdicios de alimentos.

Entre las estrategias para satisfacer las futuras demandas se enfatizan aquellas que resultan en incrementos de rendimiento por unidad de superficie y de tiempo utilizando las tecnologías que tienden a mayor productividad de los recursos e insumos disponibles y menor impacto ambiental. Entre estas se destacan ciertas tecnologías duras, pero sobre todo, tecnologías de procesos basadas en el conocimiento del funcionamiento de los cultivos, del ambiente, de la biología de plagas, y de las complejas interacciones entre los componentes del sistema de producción.

Para conceptualizar y cuantificar los posibles aportes de estas estrategias se describen y se presentan ejemplos sobre el mejoramiento genético y la biotecnología, el manejo de cultivos con base ecofisiológica, el aumento del número de cultivos por año, el manejo integrado de organismos perjudiciales y la intensificación con base ecológica.

Las estimaciones de demandas futuras realizadas en la 1.^a edición de esta obra se proyectaron sobre los valores del año 2010. En esta 2.^a edición se ajustan dichas estimaciones y se analiza el nivel de cumplimiento de las metas productivas, ambientales y sociales fijadas anteriormente a juzgar por lo acontecido en los últimos años. Se concluye sobre la necesidad de redoblar esfuerzos para moderar las demandas y reducir los efectos negativos de las actividades productivas sobre el ambiente.

Al análisis a nivel global se le agrega uno detallado por continentes para evaluar los contrastes existentes en lo referido a las posi-

bles vías de aumento de oferta de alimentos y de moderación de futuras demandas y al impacto ambiental.

En aspectos sociales se reflexiona acerca de la pobreza como causa de la desnutrición y de la inseguridad alimentaria y se profundiza el análisis de indicadores de desarrollo humano y de la equidad. La información sobre indicadores de desarrollo social, consumo de bienes y servicios y distribución de la población en función de los ingresos se integra en un análisis que permite arribar a conclusiones sobre futuras necesidades y ahorros por moderación de consumo.

Seguidamente, se indaga sobre la capacidad de innovación y de colaboración de nuestra especie y sobre las posibilidades de dirigir estas potencialidades para solucionar los problemas de alimentación, ambiente y pobreza que hoy enfrenta la humanidad. Finalmente, se plantean escenarios futuros basados en las leyes del mercado, la visión malthusiana o la necesidad de cambios profundos de valores que promuevan equidad y salud ambiental.

2. EL PASADO

2.1. El principio

El género *Homo* existe desde hace alrededor de 2,5 millones de años. La evolución del género a lo largo del paleolítico inferior se simplifica mediante una línea de tiempo en la cual el *Homo habilis* sucede a los *Australopitecus* y luego el *Homo erectus* evoluciona del *Homo habilis* (Figura 1). Posteriormente surgen los humanos arcaicos y finalmente, el hombre moderno u *Homo sapiens*. En términos generales, la taxonomía y las relaciones filogenéticas del género *Homo* permanecen aún oscuras y son materia de continua discusión (Wood, 1992).

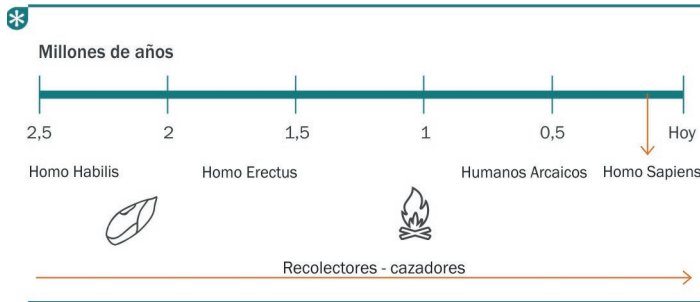
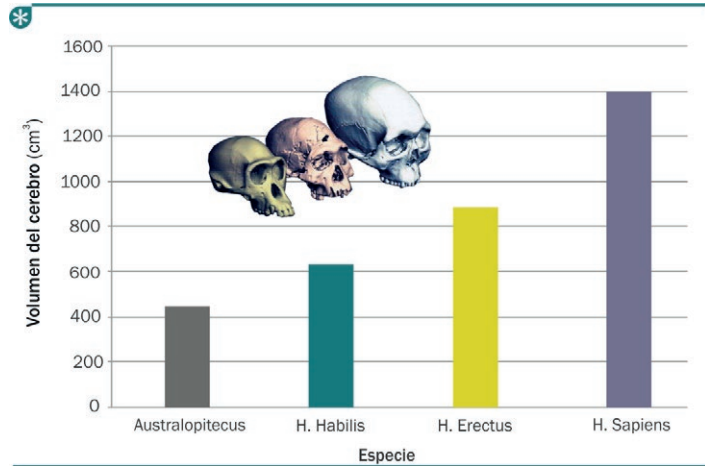


Figura 1: Evolución del género *Homo* a lo largo de 2,5 millones de años. Se indican dos de los principales hitos tecnológicos, las herramientas de piedra y el fuego.

El gran volumen cerebral, junto con el bipedalismo y la estructura social fueron importantes rasgos diferenciales de nuestro género. El volumen del cerebro fue incrementándose a lo largo de la evolución desde algo más de 400 cm³ en los *Australopitecus* hasta alrededor de 1400 cm³ en el *Homo sapiens* (Gore, 1997; Striedter, 2004) (Figura 2). Esta característica, asociada con habilidad cognitiva, creatividad, innovación y colaboración nos habría proveído versatilidad y capacidad de adaptación a ambientes hostiles y fluctuantes (Potts, 1998) como el del Valle de Rift en África oriental donde evolucionamos. Durante los últimos millones de años, el clima de esa región ha sido inestable y ha sufrido drásticos cambios alternando periodos húmedos y secos. Los individuos que poseían aquellas características ventajosas tenían mayor capacidad de adaptarse a los complejos cambios ambientales y habrían sido favorecidos por el proceso de selección natural (Darwin, 1859).



Figura 2: Evolución del volumen del cerebro desde el *Australopithecus* al *Homo sapiens*. Elaborado a partir de datos de Gore (1997) y Striedter (2004).



Paralelamente al incremento en el volumen cerebral, se fue desarrollando el lenguaje primitivo, o sea, la capacidad de formar conceptos y enunciarlos como forma de comunicación entre individuos. La transmisión de conocimientos entre personas y de una generación a otra a través del lenguaje posibilitó sumar experiencias transmitidas a las vividas, promoviendo e impulsando el aprendizaje colectivo. Esto constituyó una enorme ventaja de adaptación. Recientemente, se identificó un gen posiblemente involucrado en el desarrollo del lenguaje, capacidad exclusiva de los seres humanos (Enard *et al.*, 2002; Enard, 2011).

El *Homo habilis*, que vivió en el continente africano durante la primera parte del Paleolítico inferior, se caracterizó por su habilidad para elaborar herramientas primitivas rústicas (Ambrose, 2001) que demuestran su capacidad para el pensamiento abstracto. El *Homo erectus*, que debe su nombre a la posición erguida del cuerpo al trasladarse, aprendió a dominar y utilizar el fuego hace alrededor de 1 millón de años (Goudsblom, 1986), habilidades que le permitieron colonizar ambientes más fríos, cocinar sus alimentos y protegerse de los depredadores. Esta especie, hoy extinta, se dispersó desde África por distintas regiones del mundo, tal como lo indican los restos fósiles encontrados en Java y en Pekín. Por simplicidad, muchas veces se toma al *Homo erectus* como referente de otras especies o subespecies genéticamente interconectadas.

Los humanos arcaicos evolucionaron en África desde hace unos 800.000 años. Dentro de esta denominación se incluyen varias especies relacionadas del género *Homo* (*Homo rhodesiensis*, *Homo heidelbergensis*, *Homo antecesor* y *Homo neanderthalensis*). Esta última es la más recientemente extinguida, hace unos 40.000 años. Datos genéticos indican que la división de los linajes que condujeron a los neandertales por un lado y a los *Homo sa-*

piens recientes por el otro ocurrió entre 550.000 y 765.000 años atrás (Meyer *et al.*, 2016). El último ancestro común de estas dos especies habría sido el *Homo heidelbergensis* (Stringer, 2012), que agrupa algunos homínidos de cerebro grande del Pleistoceno medio de África, Europa, y Asia. Existe aún debate sobre cuál fue este último ancestro común, dónde vivió y cómo debería denominarse (Stelzer *et al.*, 2019).

El humano arcaico poseía una conformación ósea y proporciones de brazos, piernas y tronco muy parecidas a las del *Homo erectus*. No obstante, ambas especies se diferencian por el volumen de la cavidad craneana. A juzgar por las evidencias arqueológicas, los humanos arcaicos poseían mayor habilidad que sus antecesores para elaborar herramientas y para controlar el fuego.

Durante el largo periodo del Paleolítico inferior, la población del género *Homo*, hostigada por predadores e inclemencias climáticas entre otras adversidades, se mantuvo en niveles muy bajos. Eran pequeños grupos de recolectores-cazadores que se comportaban como una especie más del ecosistema, en equilibrio con el ambiente (Gore, 1997). Estos hábitos les proveían una dieta muy variada, sustancialmente diferente de la de los géneros predecesores, que eran fundamentalmente herbívoros. La inclusión de la carne en la dieta, alimento con alta concentración energética y nutricional, la cocción de los alimentos que aumenta su digestibilidad, y la consecuente reducción de la energía requerida por un aparato digestivo de menor volumen, posibilitaron la expansión del tamaño del cerebro, órgano de altos requerimientos (Stanford y Bunn, 2001; Wrangham, 2017).

Esta etapa que duró más de dos millones de años fue la más extensa y la más estable; fue la etapa de los escasos pero trascendentes cambios, la de la evolución lenta y continua del volumen del cerebro, que nos aportó habilidad cognitiva, creatividad, aprendizaje colectivo y, por lo tanto, capacidad de adaptación.

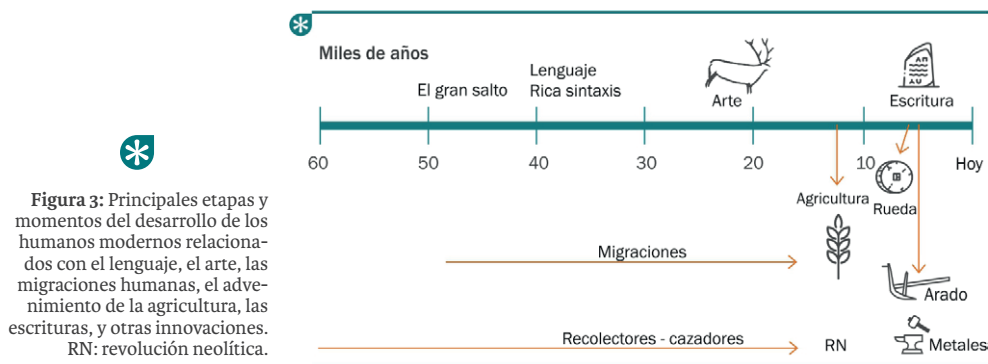
2.2. *El Homo sapiens, las migraciones*

Hacia fines del paleolítico inferior, hace unos 200.000 años, surge en África subsahariana, a partir de los humanos arcaicos, el *Homo sapiens*, nuestra especie (Klein y Edgar, 2002; Jobling y Tyler-Smith, 2003; Galway-Witham y Stringer, 2018). Trabajos recientes revelan que existió una evolución incremental de la forma craneal del *Homo sapiens* y que este proceso evolutivo fue más complejo de lo que originalmente se supuso. Si bien el *Homo sapiens* reemplazó a otras especies de humanos arcaicos y es la única sobreviviente, existen evidencias de cruzamientos interespecíficos (Galway-Witham y Stringer, 2018).

A juzgar por el volumen de su cerebro, especialmente del lóbulo frontal, el ser humano contaba en esos tiempos con un potencial intelectual equivalente al de la actualidad. Los futuros descubrimientos, hallazgos e invenciones, latentes en el cerebro de aquellos primeros humanos modernos, esperaban su momento en una ineludible secuencia.

Hace alrededor de 75.000 años, la población era muy baja y probablemente haya estado muy cerca de la extinción como consecuencia de la erupción del volcán Toba en Sumatra (Indonesia). La tremenda erupción, 3.000 veces más potente que la del Santa Elena en 1980, afectó a todo el planeta. Una nube de cenizas volcánicas que persistió varios años provocó una era de hielo. Muchas especies vegetales y animales se habrían extinguido y solo unos pocos miles de humanos modernos habrían sobrevivido gracias a su habilidad cognitiva y su capacidad de adaptación (Ambrose, 1998).

Hasta hace unos 50.000 años el comportamiento humano evolucionó lentamente. Sin embargo, a partir de dicha fecha se produce una notable aceleración en el desarrollo de la cultura humana evidenciada por una mayor diversidad y sofisticación de utensilios, herramientas de piedra y de otros materiales, el surgimiento del arte y el desarrollo del lenguaje moderno con rica sintaxis. Estos progresos son indicadores de alta capacidad de pensamiento simbólico, de creatividad e innovación y de aprendizaje colectivo y constituyen lo que Klein y Edgar (2002) denominaron el gran salto hacia adelante de la humanidad (Figura 3). Dichas cualidades se potenciaron entre sí y junto con el lenguaje moderno, que mejoró la comunicación y la transmisión de experiencias entre individuos, contribuyeron a la capacidad de adaptación de la especie.



Unos 50.000 años atrás, cuando la población humana era aún reducida, pequeños grupos de personas abandonaron África buscando nuevos horizontes. Este escaso número de individuos

habría dado origen a todas las razas de Eurasia, Oceanía y América (Figura 4). En una porción de su cromosoma Y los hombres llevaban una mutación (alteración en la secuencia del ADN) denominada M168 que transmitieron a toda su descendencia masculina (Wells, 2002). Descendientes de uno de esos grupos llegaron relativamente rápido a Australia por la ruta costera. Sucesores de otro grupo, instalados en el centro de Asia fueron el origen de migraciones hacia Europa y otras regiones de Asia. Portaban nuevas mutaciones denominadas M89 y M9, que fueron heredadas de un ancestro común y transmitidas junto con la M168 a todos los hombres de su descendencia. Los *Homo sapiens* que arribaron a Europa hace 30.000 a 40.000 años, portando la mutación adicional M173, contribuyeron probablemente a la extinción de los neandertales. No obstante, trabajos recientes indican que habrían ocurrido cruzamientos entre estas especies en esta y en otras instancias (Green *et al.*, 2010; Higham *et al.*, 2014).

Hace unos 15.000 años, un reducido número de humanos que poseían las mutaciones M89, M9 y M242 cruzó el estrecho de Bering entre Asia y América, produciéndose luego una mutación adicional en el cromosoma Y, la M3, que hoy está presente en los descendientes varones de los indígenas americanos (Wells, 2002; 2007).

La acumulación de estas mutaciones inocuas se pudo determinar obteniendo muestras de ADN de pobladores de linaje ancestral de distintos lugares del planeta y secuenciando luego el segmento del cromosoma Y que se mantuvo sin recombinar generación tras generación. Los mensajes (mutaciones) de esta porción del código genético posibilitaron ordenar temporalmente las distintas migraciones en un árbol genealógico de la humanidad y reconstruir el camino que hemos recorrido al dispersarnos por el mundo.

Los trabajos realizados con el ADN mitocondrial, que se transmite directamente de generación en generación por linaje materno, produjeron resultados asombrosamente parecidos acerca del origen común de las razas humanas. Los trabajos científicos más recientes sobre el cromosoma Y confirman que los humanos modernos se originaron en África y que las migraciones se dieron a través del mar Rojo, pero calculan que las primeras migraciones efectivas comenzaron hace unos 65.000 a 70.000 años (Karafet *et al.*, 2008; Wei *et al.*, 2013).

Este fascinante relato se basa en evidencias científicas firmes y reproducibles (Cavalli-Sforza y Feldman, 2003; Shreeve, 2006 a y b). Infrecuentes errores de copiado que se transmitieron de los padres a los hijos a lo largo de miles de generaciones permitieron rastrear hacia la profundidad del pasado nuestro origen como especie humana. Durante dichas generaciones portábamos en nuestra misma esencia, en el ADN, el relato de nuestros orígenes

escrito en jeroglíficos químicos. En nuestros genes portábamos también la capacidad intelectual necesaria para descifrarlos.

Dicha capacidad intelectual potenciada por las interacciones humanas nos permitió enfrentar y solucionar los problemas que surgían en las nuevas regiones exploradas. Además, nuevas tecnologías, por ejemplo para cazar, seguramente contribuyeron a la exitosa diseminación de nuestra especie por todo el planeta.

Estas evidencias científicas basadas en la biología molecular aportan sólidos argumentos a favor de la teoría de las migraciones (Stringer y Andrews, 2005) y acorralan a la alternativa teoría multirregional que afirma que el ser humano moderno surgió simultáneamente en distintos lugares del planeta a partir de las especies predecesoras (Wolpoff y Caspari, 1996).

Sobre la base de la información presentada, se puede afirmar que los habitantes originarios de las distintas regiones de la tierra constituimos un grupo estrechamente emparentado.

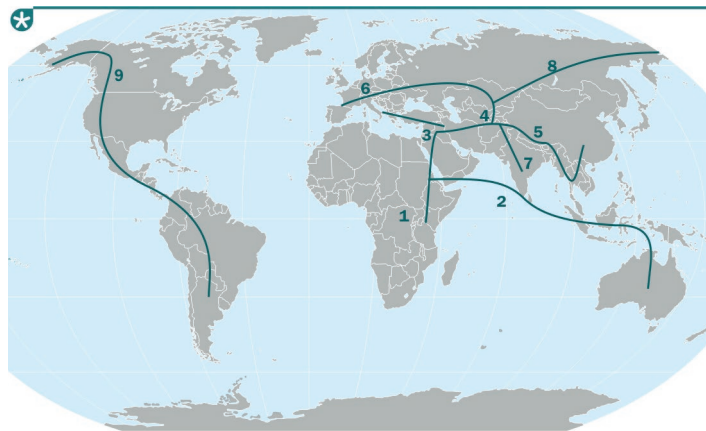


Figura 4: Migraciones humanas en el espacio y el tiempo en función de mutaciones en el cromosoma Y. Elaborado a partir de datos de Wells (2002). Otras investigaciones con base molecular, si bien difieren en detalles sobre los años y trazados geográficos, indican patrones de migraciones muy semejantes. Se adjunta esquema del sector no recombinable del cromosoma Y mostrando las mutaciones M168 (A), M168 y M9 (B) y M168, M9 y M3 (C).

Cromosoma Y			
	A	B	C
M168	█	█	█
M9	█	█	█
M3	█	█	█

1. M 168	50000 años
2. M 130	50000 años
3. M 89	45000 años
4. M 9	40000 años
5. M 175	35000 años
6. M 173	30000 años
7. M 20	30000 años
8. M 242	20000 años
9. M 3	10000 años
10. M 172	10000 años

La población humana creció lentamente al compás de su dispersión por el mundo, alcanzando cerca de 10 millones de habitantes al fin de la era paleolítica hace unos 12.000 años. Los humanos modernos del paleolítico medio y superior también vivían en pequeños grupos que dependían de la caza, la pesca y la recolección

de productos vegetales, por lo que su alimentación era muy variada. Estaban en buena armonía con la naturaleza, aunque generaban cierto impacto sobre el paisaje y la fauna a través del fuego y de la caza. El dominio del fuego proporcionó a la humanidad una poderosa herramienta no disponible para otras especies, que la favoreció en el camino hacia el control de los elementos. Algunos de nuestros ancestros se maravillaban observando las estrellas, con las que imaginaban figuras y encontraban patrones que, junto con las posiciones del sol a lo largo del año, les permitían predecir las estaciones frías, cálidas, húmedas o secas y guiar sus viajes, traslados y migraciones.

Esta fue la etapa de las migraciones, de la expansión de las fronteras, la etapa del desarrollo del lenguaje moderno, la de los comienzos del arte. Las mentes curiosas y creativas nos impulsaron a aventurarnos hacia tierras desconocidas y a recorrer un largo e intrincado camino que nos conduciría inexorablemente al desarrollo del potencial intelectual y de la innovación tecnológica.

2.3. El origen de la agricultura

Al final de la última glaciación, alrededor de 15.000 años atrás, el clima se tornó más benigno por un aumento en la temperatura. La región del creciente fértil, ubicada en el SO de Asia, contaba con inviernos húmedos y veranos secos. Estas condiciones climáticas favorecían el crecimiento de pastos invierno-primaverales entre los que se encontraban el trigo, la cebada y el centeno, que fructificaban y maduraban hacia fines de la primavera. Los humanos comenzaron a aprovechar esta abundante producción, recolectando y almacenando los granos y, posteriormente, cultivando dichas especies vegetales (Flannery, 1973; Gupta, 2004). Alguien, muy probablemente una mujer, observando los residuos de los asentamientos, descubrió que las semillas que recolectaban podían generar las plantas que las originaban.

A partir de este descubrimiento, hace unos 10.000 a 12.000 años se comenzaron a sembrar, a cuidar e incluso a irrigar los primeros cultivos. La evidencia recabada indica que la domesticación de plantas fue un proceso consciente basado en conocimientos (Abbo y Gopher, 2017; 2020). Simmons (2007) presenta distintas teorías acerca de cómo los humanos comenzaron a producir sus alimentos.

Los hallazgos de Kenyon en Jericó constituyen los vestigios más antiguos de la agricultura. Este proceso se repitió posteriormente en otros lugares del mundo. Los humanos aprendieron a cultivar el arroz y el mijo en el este de Asia, el maíz en Centroamérica y la papa en los Andes. Los cambios indicados, conjuntamente con

la domesticación de los animales, se conocen como la revolución neolítica (Gordon Childe, 1978; Larson *et al.*, 2014) (Figura 3). Fue un paso gigante de la humanidad ya que permitió hábitos más sedentarios y, por lo tanto, la aparición de las primeras ciudades y civilizaciones.

La difusión de la agricultura por el mundo se produjo desde hace unos 10.000 años favorecida por las migraciones de algunos grupos humanos. Por ejemplo, una migración portando el marcador M172 difundió los cultivos de trigo, cebada y centeno desde el Medio Oriente a Europa y Egipto. El desplazamiento fue más cultural y tecnológico que genético, ya que solo el 20 % de los europeos desciende de esta corriente inmigratoria (Wells, 2002). Hacia la misma época, se propagaron los cultivos de mijo y arroz en el este de Asia en concordancia con el desplazamiento de los humanos que portaban el marcador M122 (Wells, 2002). En América, el maíz se difundió en América Central y la papa en la región de los Andes. La difusión de los cultivos habría sido más favorecida en Eurasia que en América debido, principalmente, a características ambientales más uniformes y a menores barreras geográficas (Diamond, 1997).

La domesticación del caballo en Asia Central hace unos 5.500 años y su posterior difusión (Outram *et al.*, 2009) proveyó fuerza motriz y velocidad a los desplazamientos y a las comunicaciones. El caballo habría favorecido la difusión de las lenguas indoeuropeas, que incluyen más de 150 idiomas hablados por cerca de la mitad de la población mundial actual (Crystal, 1987).

La capacidad innovadora del ser humano continuaba expresándose (Figura 3). La rueda, invento revolucionario de hace unos 6.000 años, facilitó el traslado y el transporte de cargas y fue un componente vital de diversas máquinas e invenciones (Anthony, 2007). El arado, que se inventó hace unos 5.000 años, fue un gran paso en la agricultura ya que facilitó el control de malezas y la preparación de la cama de siembra y permitió la expansión del área cultivada. Desde esos tiempos aprendimos también a extraer, fundir, combinar y forjar los metales para la fabricación de herramientas, vasijas, armas y adornos de mayor dureza y resistencia (Margueron, 2002; Smil, 2017).

Simultáneamente con estas extraordinarias invenciones surgieron las primeras escrituras en el valle del Nilo, en la Mesopotamia asiática y en China (Powell, 2009), en respuesta a la necesidad de almacenar la cada vez más abundante información. La escritura aportó una significativa memoria adicional a la humanidad, potenciando la transmisión de información y experiencias. En los comienzos, la escritura y su interpretación eran privilegios de muy pocas personas. Esta “segunda memoria” del ser humano

posibilitó la comunicación con futuras generaciones dando origen a la historia.

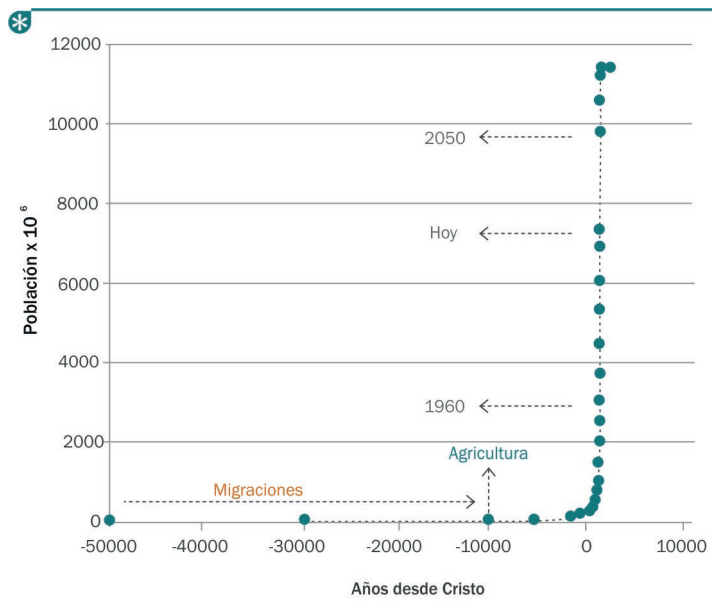
Durante el periodo neolítico desarrollamos gradualmente nuevas culturas y logramos poseer un mayor control de los elementos. Los astros alimentaban nuestra imaginación y nos indicaban los momentos de las siembras de los cultivos. Inicialmente, confiábamos plenamente en los relatos míticos y en verdades reveladas. Posteriormente, en la época de los antiguos griegos, surgió la filosofía que, basada en la capacidad racional inherente al ser humano, comenzó a cuestionar los mitos ancestrales (Gaarder, 1994).

Con el advenimiento de la agricultura que aumentó la disponibilidad de alimentos, se produjo una incipiente ola de crecimiento poblacional que se consolidó con el comienzo de las civilizaciones, las manufacturas, la metalurgia, y los gobiernos centralizados (Rasmuson y Zetterstrom, 1992). La población aumentó lentamente desde cerca de 10 millones en el año 10.000 a. C. a alrededor de 200 millones en el año 0 (Dorn, 1962; Caldwell y Schindlmayr, 2002) (Figura 5). En los tiempos de Cristo, un tercio de los habitantes del mundo correspondían al imperio romano y otro tercio al imperio chino. En la antigüedad, el consumo anual de energía primaria per cápita era muy bajo, posiblemente inferior a 10 Giga-joules por persona. Los humanos eran la principal fuerza motriz y la madera constituía más del 90 % del combustible utilizado, seguida por el carbón vegetal (Smil, 2017).

Más allá de los beneficios indicados, la agricultura junto con los hábitos sedentarios resultaron en una menor variedad de la alimentación, mayor exposición de la población a fluctuaciones climáticas que afectaban a los cultivos, mayor incidencia de enfermedades por aglomeración en ciudades, estratificación social y conflictos de mayor escala. Por ejemplo, hace unos 4.000 años, sequías prolongadas tuvieron efectos devastadores en las antiguas civilizaciones del norte de la Mesopotamia asiática, Egipto, China y de otras regiones del mundo (Courty y Weiss, 1997). Otras civilizaciones antiguas fueron afectadas por la sobreexplotación de los bosques que constituían una importante fuente de recursos, desplazando el eje del progreso hacia nuevas regiones (Sakaiya, 1994). Los primeros asentamientos evolucionaron en ciudades, y estas en civilizaciones, algunas de las cuales originaron imperios. Este patrón, que se repitió en las distintas regiones del planeta, condujo irremediablemente a superposiciones de espacio, intereses y creencias que desencadenaron guerras y conflictos. Los descendientes de los humanos que cruzaron el mar Rojo decenas de miles de años atrás, se enfrentaron en sangrientas batallas, ignorando su origen común.

Por estos motivos algunos pueden pensar que el advenimiento de la agricultura fue un paso no muy favorable para la especie humana. Sin embargo, los hábitos sedentarios y la aparición de las primeras ciudades trajeron consigo el ocio creativo y mayores posibilidades de articulaciones virtuosas entre las personas. La creatividad y la innovación fueron nutridas por la agricultura, movilizadas por la rueda, difundidas por el lenguaje y las escrituras, y cultivadas por el ocio de las civilizaciones. Se nos presentó así un camino de misterios, preguntas y desafíos que nos conducirían inexorablemente a descubrimientos y futuras revoluciones tecnológicas. Transitar este camino fue y es parte esencial de la naturaleza humana.

Figura 5: Evolución de la población humana desde 50.000 años a. C. hasta nuestros días y proyección futura según estimaciones de UN (2019; variante media). Se espera que la población mundial esté cerca de la estabilización en el año 2100 (UN, 2019).



2.4. La Edad Media

Durante la Edad Media, las posiciones dogmáticas y las verdades reveladas volvieron a prevalecer. En esta época, la lectura, la escritura y el conocimiento eran privilegios de los que ejercían el poder, o sea la iglesia, los gobernantes y los señores feudales. Los libros eran escasos y caros, y los monjes en los monasterios eran los responsables de copiar y traducir al latín los manuscritos autorizados. Un alto porcentaje de la población era analfabeta y hasta bien entrada la Edad Media la comunicación oral prevalecía. Lo común era escuchar relatos verbales en lugar de ver y leer textos en silencio, situación que fue cambiando lenta y gradualmente durante esta etapa (De Las Heras, 2010).

La Edad Media, entonces, se caracterizó por restricciones al acceso a la información y a la independencia para interpretarla, a la creatividad y a la innovación (Gaarder, 1994). Sin embargo, a lo largo de esta prolongada etapa se produjeron innovaciones y logros principalmente en China y Europa occidental. Entre estos resaltan los molinos de viento, las ruedas de agua, la mejora de arneses de caballo de tiro, la pólvora, los altos hornos, la construcción de canales navegables y rutas (Smil, 2017). Como aspecto destacable, hacia fines de la Edad Media, comenzaron a crearse universidades en Europa. Los intercambios vía terrestre de ideas, cultivos, animales domésticos, tecnologías y bienes entre Europa y Asia fueron favorecidos por no existir grandes obstáculos geográficos ni diferencias climáticas importantes y por disponer del caballo como medio de movilización. Durante la Edad Media, no obstante, se inician los viajes distantes con barcos a vela en busca de nuevas rutas y horizontes, lo que condujo al redescubrimiento de continentes, que ya habían sido explorados y habitados por los descendientes de los humanos que partieron de África hacia el mundo mucho tiempo atrás.

En la sociedad predominaba la austeridad, en contraposición a la abundancia de algunas civilizaciones antiguas (Sakaiya, 1994). El consumo anual de energía primaria era muy bajo en comparación con etapas más tardías. Además, el 80 % de la fuerza motriz era aportada por los humanos y el resto por los animales, las ruedas de agua y los molinos de viento (Smil, 20127). Los principales combustibles seguían siendo la madera (más del 80 %) y el carbón vegetal (15 %), mientras que el carbón mineral, los residuos de cosechas y el estiércol seco se utilizaban en cantidades muy bajas (Smil, 2017). Los combustibles eran utilizados principalmente para calentar e iluminar los hogares, para cocinar, y para pequeñas manufacturas artesanales.

La agricultura en este periodo se caracterizaba por los bajos rendimientos producto de la utilización de poca tecnología, por lo que el impacto ambiental de la actividad productiva era bajo (Sweeney, 1995). Los cereales rendían en promedio 0,5 t/ha, las tierras se barbechaban uno de cada 3 años, no se utilizaban fertilizantes y los cultivos estaban expuestos a severas mermas por enfermedades, plagas animales y malezas y por efectos climáticos.

Durante la Edad Media, el crecimiento poblacional fue muy lento debido a guerras, hambrunas y enfermedades (Rasmuson y Zetterstrom, 1992). Los frecuentes conflictos bélicos se debían a la ambición de riqueza, territorios y poder político, y a motivos religiosos. Las hambrunas eran recurrentes y se debían a la inestabilidad de los rendimientos de los cultivos y a la baja variedad de

productos alimenticios. Las enfermedades eran favorecidas por las aglomeraciones humanas en condiciones sanitarias muy precarias.

La tasa anual de natalidad era muy alta (40-50 por mil), pero la población crecía poco pues la mortalidad también era alta debido a las causas enunciadas. Entre los años 1.000 y 1.300 d. C. se produjo un crecimiento poblacional lento pero sostenido del 0,2 % anual, favorecido por la reducción de conflictos armados y la introducción de nuevas especies cultivadas, entre las que se destacó la lenteja, rica en proteínas. Luego, a mediados del siglo XIV, la población fue diezmada por la peste negra, la más trágica pandemia experimentada por la humanidad. Como consecuencia de este desastre, la cantidad de habitantes en el mundo se redujo de 450 millones a menos de 375 millones a fines del siglo XIV y algunos poblados quedaron desiertos (USCB, 2010).

A pesar de esta terrible tragedia y del letargo transitorio de la creatividad humana, el mundo occidental estaba a las puertas de un movimiento cultural que tendría formidables consecuencias en el desarrollo del arte, la ciencia y la tecnología.

2.5. El Renacimiento

Durante el siglo XV comenzó a producirse en Occidente un prodigioso movimiento de desarrollo en el arte y en la ciencia conocido como el Renacimiento (Kenny, 2006; Moscardi, 2003). En oposición a la especulación filosófica y al poder del razonamiento, se consolidó el método científico como principal fuente de generación de conocimiento. Dicho método se basa en poner a prueba recurrentemente los resultados que se recaban a través de experimentos o de observaciones empíricas, buscando consenso de la naturaleza y de toda la comunidad científica, intentando formular leyes y teorías cada vez más precisas y universales. La ciencia, ni escéptica ni dogmática, se contrapone claramente a las pseudociencias, que acumulan coincidencias y descartan contradicciones. Así, la generación del conocimiento y de las consecuentes invenciones e innovaciones se aceleraba (Figura 6).

La invención de la imprenta por los chinos primero y posteriormente por Gutenberg a mediados del siglo XV (Figura 6) permitió la difusión del creciente caudal de conocimientos que, por estar más expuestos y accesibles, potenciaban a la vez la realización de nuevos estudios y descubrimientos. El poder del saber ya no era exclusivo de unos pocos privilegiados.

La ciencia se desarrollaba y cuestionaba los relatos bíblicos. Copérnico desarrolló la teoría heliocéntrica en el siglo XVI. A principios del siglo XVII, Kepler enunció las leyes del movimiento de los planetas alrededor del sol. Para la misma época, Galileo

construyó y perfeccionó un telescopio y con sus observaciones confirmó que los astros no giran alrededor de la tierra y que el sol es una estrella más en la Vía Láctea. Por último, a fines del siglo XVII, Newton formuló la ley de gravedad, que rige los movimientos de los astros.

Juntamente con estos avances en física y astronomía, se condujeron experimentos en el área de la biología vegetal que nos dieron los primeros indicios acerca de los factores determinantes del funcionamiento de las plantas, especialmente en relación con la fotosíntesis (Govindjee y Krogmann, 2004) (Figura 6).

En el año 1640, Van Helmont realizó un experimento que consistió en trasplantar un árbol joven a un recipiente con suelo y cultivarlo por 5 años. Pesó el suelo y la planta separadamente al principio y final del ensayo, determinó el aumento de biomasa del árbol y midió el agua agregada a través de los años. Concluyó que el suelo no contribuía al crecimiento de los vegetales pues el peso de este apenas había variado a lo largo del experimento. Dedujo entonces que el peso que el árbol había acumulado durante esos años provenía del agua agregada. Si bien esta deducción era incorrecta, representaba un primer avance al destronar la idea preexistente de que el material constituyente de las plantas provenía principalmente del suelo. Fue el primer experimento sobre fisiología vegetal. Más de 100 años después, en 1772, Priestley realizó una serie de experimentos utilizando ratones, velas y plantas y descubrió que estas últimas refrescaban el aire y posibilitaban que los ratones siguieran viviendo y las velas continuaran ardiendo en campanas de vidrio cerradas. Priestley halló así evidencias de que las plantas producen un gas que luego Lavoisier denominó oxígeno. Pocos años después, Ingenhousz descubrió que para que esto ocurriera las plantas debían estar iluminadas remarcando así el rol de la luz en la fotosíntesis. Posteriormente, Senebier demostró en 1782 que las plantas captan dióxido de carbono (CO_2) y Saussure descubrió en 1804 que el agua también aporta a la materia orgánica de los vegetales. Estos trabajos indicaron que las plantas se nutren de dióxido de carbono, agua y luz y sentaron las bases para la descripción detallada del complejo proceso de la fotosíntesis que convierte la energía solar en materia orgánica (Blankenship, 2008) y que constituye el comienzo de la cadena trófica en los ecosistemas.

Con el Renacimiento se reafirmó el valor del conocimiento para el desarrollo de la humanidad y se generaron las bases para las revoluciones en producción agrícola de épocas venideras. El ocio creativo de las civilizaciones estaba dando sus frutos. En círculos virtuosos, estas cualidades eran potenciadas y retroalimentadas por los productos de nuestra capacidad intelectual.

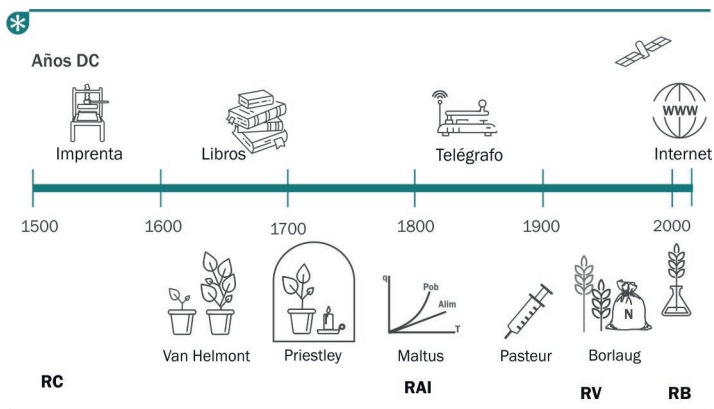
La población mundial se incrementó de menos de 400 millones a principios del siglo XV a alrededor de 500 millones a principios del siglo XVI y a 800 millones en 1750 (Figura 5) (Dorn, 1962; USCB, 2010). La expansión resultante de la demanda de alimentos era acompañada por aumentos proporcionales en la producción agrícola.

En aquellas épocas, la economía estaba más desarrollada en el oriente. China e India sumaban en el año 1600 más del 50 % del producto bruto interno mundial, mientras que los países de Europa occidental aportaban solo el 20 % (Maddison, 2001; Tugore Ques, 2016).

En los siglos previos a la Revolución Industrial, los humanos y los animales aportaban más del 80 % de la fuerza motriz y el resto lo proveían las ruedas de agua y los molinos de viento. Se utilizaban prácticamente los mismos combustibles que en la Edad Media. El consumo anual de energía primaria era algo inferior a 20 Giga-joules por persona a nivel global (Smil, 2017). Pero en las décadas próximas a la Revolución Industrial aumentó el requerimiento energético para procesos de manufactura a mayor escala como la elaboración de ladrillos, cerámicos, vidrio y objetos metálicos.

El descubrimiento de América dio comienzos a un proceso de intercambio intercontinental de cultivos, animales, enfermedades, metales y seres humanos que moldeó el futuro del mundo. Dicho proceso contribuyó al avance y el predominio de Europa basado en la explotación de indígenas americanos y de esclavos africanos. En los 3,5 siglos posteriores al descubrimiento, casi 12 millones de esclavos africanos y 3,4 millones de europeos migraron a América. La población nativa americana, que originalmente contaba con varias decenas de millones, se redujo un 90 % debido, principalmente, a enfermedades portadas por los europeos (Mann, 2013).

Figura 6: Hitos científico-tecnológicos ligados a la agricultura y a las comunicaciones desde el Renacimiento (1.500 d. C.) hasta nuestros días RC: Renacimiento; RAI: revolución agrícola e Industrial; RV: revolución verde; RB: revolución biotecnológica.



2.6. La Revolución Agrícola y la Revolución Industrial

Las poblaciones de Europa, China y de otras regiones del mundo estuvieron sometidas a frecuentes hambrunas durante los siglos XVI y XVII. Sin embargo, desde fines del siglo XVII se produjo la llamada “Revolución Agrícola”, caracterizada por un rápido y masivo crecimiento de la producción que aumentó considerablemente la oferta de alimentos (Bellis, 2010). Este proceso se basó, fundamentalmente, en la implementación de rotaciones, mejores herramientas, nuevos cultivos, abonos y la expansión de la superficie cultivada. Los nuevos cultivos provenientes del continente americano, entre los que se destacaron la papa, el maíz y la batata, fueron un componente esencial de la revolución agrícola. Los dos primeros se adoptaron en Europa y la batata y el maíz en China. Estas especies, que se difundieron durante el siglo XVIII, cambiaron los sistemas de producción agrícola hasta el momento predominantes y contribuyeron a alimentar a las crecientes poblaciones reduciendo drásticamente la incidencia de hambrunas (Mann, 2013).

La “Revolución Industrial” que se originó en Inglaterra desde mediados del siglo XVIII consistió en el paso de una economía agraria y artesana a otra industrial y mecanizada, caracterizada por la utilización de la máquina a vapor y nuevos materiales como el acero, y por la difusión del uso de carbón mineral como fuente de energía (Ashton, 1948; Moscardi, 2003).

El hito emblemático del origen de la Revolución Industrial fue el patentamiento de la máquina de vapor rediseñada por James Watt, otorgado en 1769. Esta máquina lograba un uso mucho más eficiente del vapor y del combustible en comparación con sus predecesoras. El poder y la eficiencia de las máquinas a vapor siguió creciendo con el correr de las décadas (Smil, 2017).

A fines del siglo XVIII, cuando la población del mundo rondaba los 900 millones y la de Europa los 200 millones (Caldwell y Schindlmayr, 2002), Malthus (1798) predijo hambrunas generalizadas, con la consecuente reducción en la población, al observar que el crecimiento poblacional superaba al de la producción de alimentos (Figura 6). Malthus argumentaba que la mayor disponibilidad de alimentos producía un incremento más que proporcional en el crecimiento poblacional por estar las personas, y sobre todo los niños, menos afectados por enfermedades, lo que a su vez generaba mayores demandas de alimentos y nuevas hambrunas. Esto se denominó la trampa malthusiana. Pero luego se vio que la disponibilidad de alimentos aumentaba conjuntamente con el crecimiento poblacional (Rasmuson y Zetterstrom, 1992), postergando las hambrunas generalizadas predichas por Malthus, quien no había tenido en cuenta, en su real dimensión, el aporte de la innovación tecnológica en la oferta de alimentos.

Satisfacer las demandas de la creciente población requirió un importante aumento de la superficie cultivada y la utilización de ciertas prácticas basadas en el uso de insumos. Durante el siglo XIX, se difundió la utilización de fertilizantes para solucionar los problemas de agotamiento de los suelos. Liebig (1841) demostró que las plantas se nutren de soluciones minerales del suelo y desarrolló las bases para la utilización de fertilizantes en los cultivos. Sobre estos conocimientos, se difundió la utilización del guano proveniente del Perú. Este fertilizante resulta de la acumulación de excrementos de aves marinas en zonas costeras secas y es muy rico en nitrógeno, fósforo y potasio, los tres principales nutrientes de las plantas. Posteriormente, el guano fue reemplazado por productos basados en nitratos provenientes de Chile. Finalmente, a principios del siglo XX, los alemanes Haber y Bosch desarrollaron el proceso de síntesis de amoníaco a partir de nitrógeno atmosférico (Haber, 1920). La disponibilidad de fertilizante nitrogenado sintético barato fue uno de los pilares de la futura revolución verde.

A fines del siglo XIX surgieron también en Europa los primeros plaguicidas. Estos fueron el caldo bordelés (sulfato de cobre) que se utilizó inicialmente contra el tizón de la papa, y el verde París (acetoarsenito de cobre) que se empleó para combatir al escarabajo de la papa (Mann, 2013). El uso masivo de plaguicidas, sin embargo, recién se daría a partir de mediados del siglo XX.

Los nuevos sistemas de producción, no obstante, mostraban importantes signos de inestabilidad. Un ejemplo lo constituye la enfermedad fúngica denominada tizón de la papa que diezmo plantaciones de Europa a mediados del siglo XIX. El hongo causante (*Phytophthora infestans*) provocó estragos en los cultivos de papa, que no contaban con la variabilidad genética necesaria. La enfermedad afectó principalmente la población de Irlanda, que sufrió una terrible hambruna por depender en gran medida de este alimento. Muchos murieron y muchos más emigraron (Mann, 2013). La diáspora irlandesa fue la mayor emigración relativa registrada en una nación.

Otro ejemplo de fragilidad de los sistemas de producción de aquellas épocas se observó en China, donde el avance de los cultivos de maíz y batata sobre tierras deforestadas produjo problemas de erosión e inundación que sumados a la acidificación y agotamiento de los suelos contribuyeron a las hambrunas que azotaron ese país durante el siglo XIX (Mann, 2013).

La Revolución Industrial contribuyó fuertemente al ascenso de las economías occidentales que alcanzaron posiciones hegemónicas en los siglos venideros. Además, desde mediados del siglo XIX comenzó a predominar el movimiento migratorio de europeos a América, principalmente a Norteamérica y al Río de la Plata.

Durante los siglos XVIII y XIX, el porcentaje de la población mundial mayor a 15 años con educación básica se mantuvo por debajo del 20 %. No obstante, en varios países europeos dicho porcentaje superaba el 70 % (Roser y Ortiz Ospina, 2018).

Durante el siglo XIX se avanzó, además, en los conocimientos sobre biología y genética vegetal, y se progresó en materia de comunicaciones. Se elaboraron la Teoría de la Evolución (Darwin, 1859) y las Leyes de Mendel (1865) las cuales constituyen las bases de la genética. En 1838, Morse había inventado el telégrafo que permitió comunicaciones a distancia vía tendidos de cables. Luego Faraday descubrió la inducción electromagnética y los campos de fuerza, conceptos que Maxwell volcó en ecuaciones matemáticas. Posteriormente, Hertz logró propagar ondas por el espacio libre utilizando descargas eléctricas. Basado en estos conocimientos, Marconi desarrolló a fines del siglo XIX la telegrafía inalámbrica por medio de ondas electromagnéticas. Estas innovaciones marcaron el comienzo de una serie de progresos en telecomunicaciones que mejoraron notablemente la transmisión de información y redujeron las distancias.

La Revolución Industrial significó un mayor consumo global de energía primaria anual ya que subió de menos de 20 a 40 Gigajoules por habitante entre 1750 y 1950 (Smil, 2017). A fines del siglo XIX, la máquina a vapor pasó a ser la principal fuente de fuerza motriz y poco tiempo después, en los primeros años del siglo XX, el carbón se convirtió en el principal combustible (Smil, 2017).

La importante ampliación de los conocimientos científicos y de las tecnologías derivadas de estos permitió aumentar la producción y el consumo de alimentos, de bienes y de energía, lo que significó una intensificación en el uso de los recursos naturales.

Como se describió anteriormente, los nuevos sistemas productivos eran inestables y generaban problemas ambientales. Sin embargo, esta fue una etapa de producción agrícola extensiva de bajos insumos, por lo que el impacto ambiental global fue moderado, principalmente asociado con deforestaciones, inundaciones y agotamiento y erosión de los suelos.

2.7. La Revolución Verde y la actualidad

En la segunda mitad del siglo XIX, Pasteur y Koch descubrieron que las enfermedades infecciosas tienen su origen en gérmenes que pueden propagarse entre personas. Gracias a este descubrimiento fue posible adoptar medidas capaces de eliminar los microorganismos causantes de numerosas enfermedades e infecciones y salvar muchas vidas por medio de vacunas (Dubos, 1985). Estas innovaciones produjeron una prodigiosa reducción de la mortalidad, especialmente de la infantil que, junto con el man-

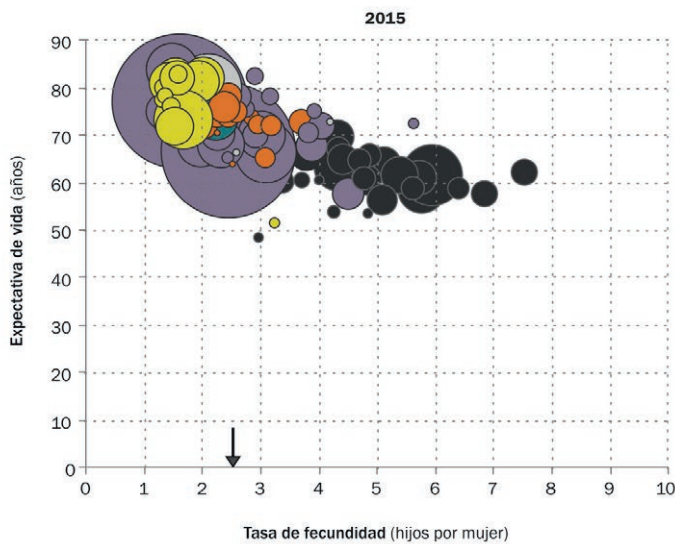
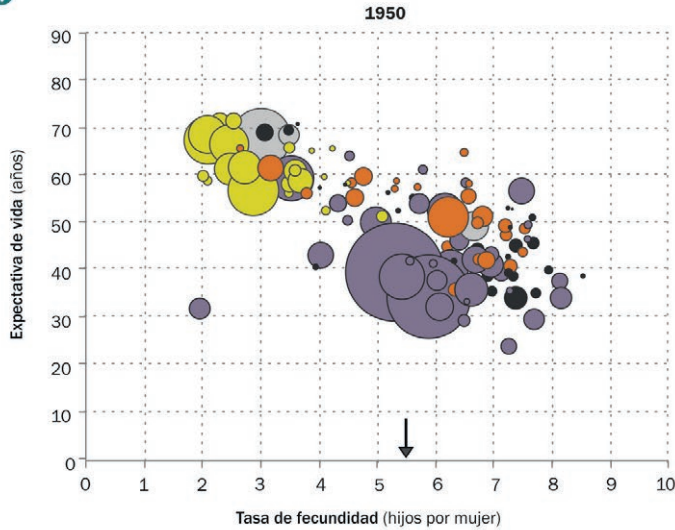
tenimiento de altas tasas de natalidad, resultaron en un marcado incremento en la tasa de crecimiento poblacional, que a mediados del siglo XX llegó al 2,1 % anual. La población del mundo había crecido de 1.000 millones a principios del siglo XIX a 3.000 millones en 1960 (Figura 5) (UN, 2008). Nuevamente, se pronosticó un futuro de hambrunas generalizadas tal como lo hiciera Malthus a fines del siglo XVIII. En línea con dichas predicciones, Ehrlich (1975) concluyó que alimentar a la población estimada para fines del siglo XX era, en la práctica, imposible. Los pronósticos negativos no se cumplieron debido a que después de la mitad del siglo XX comenzó a caer la tasa de crecimiento de la población y se produjo un notable aumento de rendimiento en los principales cultivos.

La tasa de crecimiento poblacional comenzó a disminuir desde fines de la década de 1960 hasta llegar actualmente a valores cercanos a 1,1 % anual. En concordancia con estas proyecciones, en las últimas 6 décadas la tasa de fecundidad mundial se redujo de más de 5,5 a 2,5 hijos por mujer (Figura 7).

En lo referente a la producción de alimentos, la superficie total cultivada en el mundo, que había sido el principal factor de ampliación del volumen producido hasta mediados del siglo XX, presentó incrementos relativamente bajos a partir de 1960. Sin embargo, la producción de los cultivos se incrementó de manera consistente durante las últimas 6 décadas debido, principalmente, a un aumento en los rendimientos por unidad de superficie como consecuencia del proceso denominado “Revolución Verde” (Borlaug, 2007).

La revolución verde se dio por la conjunción de innovaciones con una fuerte sinergia: a) disponibilidad de fertilizante nitrogenado relativamente barato, b) cultivares con mayor potencial de rendimiento, y con genes de tolerancia a enfermedades, de estatura reducida que permitieron disminuir el vuelco asociado con altas dosis de fertilizantes, y de insensibilidad fotoperiódica que les proveían amplia adaptación a distintas latitudes y c) nuevos herbicidas que hicieron posible la difusión de estos cultivares, pobres competidores con las malezas (Evans, 1997; Borlaug, 2007). El proceso involucró, principalmente, a los cultivos de trigo y arroz. Norman Borlaug, llamado Padre de la revolución verde, recibió el Premio Nobel de la Paz en 1970 por su impulso y contribución a esta causa.

Los alcances de las tecnologías de la revolución verde en el mundo fueron muy contrastantes entre regiones. Pellegrini y Fernández (2018) indicaron que muchos países de Europa, Estados Unidos y Japón utilizaron altos niveles de energía por hectárea (como fertilizantes, combustibles y construcción y mantenimiento de maquinaria) en la producción agrícola y mantuvieron o redujeron la



● África ● Asia ● Europa ● Norteamérica ● Oceanía ● Sudamérica



Figura 7: Tasa de fecundidad y expectativa de vida en los distintos países del mundo en 1950 y 2015. Cada círculo corresponde a un país y su área es proporcional a la población^{0,75}. El relleno indica el continente al que cada país pertenece. El círculo más grande corresponde a China y el segundo a India. Los países europeos, Estados Unidos, Canadá y Australia ya presentaban en 1950 altas expectativas de vida y bajas tasas de fecundidad. Durante los últimos 60 años, la mayor parte de los países de Asia, África del norte, América latina, y Oceanía redujeron la tasa de fecundidad y aumentaron la expectativa de vida. La mayor parte de los países de África subsahariana está retrasada en cuanto a la evolución de estas variables de desarrollo. Las flechas indican la tasa de fecundidad promedio del mundo. Datos extraídos de Gapminder (2020).

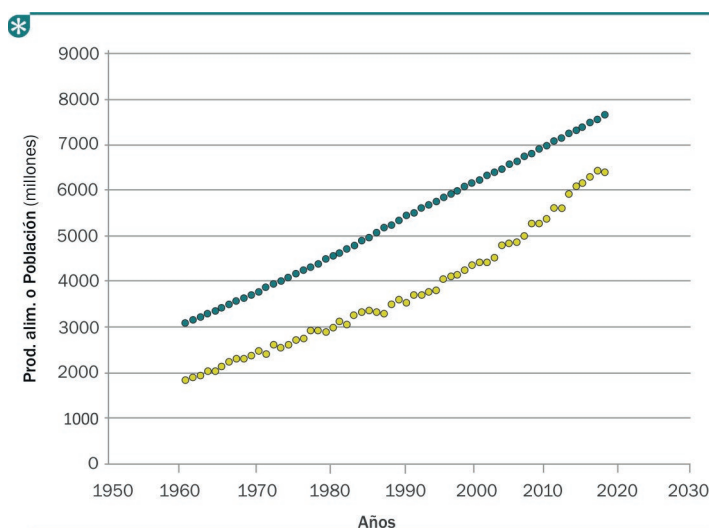
superficie cultivada desde 1960. Por el contrario, la mayoría de los países de Sudamérica y África y algunos de Asia emplearon baja cantidad de energía por unidad de superficie e incrementaron la superficie cultivada en dicho periodo. China y Egipto mostraron altos valores para ambas variables, mientras que Bangladesh, India y Pakistán presentaron moderados niveles de uso de energía y prácticamente no cambiaron la superficie cultivada. Por lo tanto, el proceso de la revolución verde no afectó a todos los países de manera similar, e incluso no alcanzó a muchos países en vías de

desarrollo (sobre todo de África). Hay países que intensificaron y ahorraron tierra, otros que aumentaron superficie cultivada sin mucha intensificación, y otros que hicieron ambas cosas (Pellegrini y Fernández, 2018). En términos generales, el abundante y mal uso de insumos químicos y del riego generó, principalmente, problemas de contaminación de suelos y aguas, emisiones de gases de efecto invernadero, sobreexplotación de recursos hídricos y salinización y sodificación del suelo (Rockström *et al.*, 2009a; Gordon *et al.*, 2017). Contrariamente, la expansión de la superficie cultivada causó, mayormente, problemas de pérdida de biodiversidad; excesos hídricos con la consecuente erosión, inundación, y salinización; degradación de suelos por pérdida de materia orgánica y fertilidad; y emisiones de CO₂ por pérdida de carbono de suelo y de biomasa (Rockström *et al.*, 2009a; Gordon *et al.*, 2017).

Más allá de las diferencias mencionadas, la producción global de cultivos aumentó 3,5 veces de 1960 a 2018 (Figura 8) debido, principalmente, a mayores rendimientos por unidad de superficie. Paralelamente, la producción de carne (vacuna, porcina y aviar) se incrementó 5 veces. Estos valores superaron al crecimiento poblacional que fue de 2,5 veces en el mismo periodo (Figura 8), lo que resultó en una mayor producción y disponibilidad de alimentos por persona a nivel global (Figuras 9 y 10). La producción agrícola *per cápita* creció 43 % y la producción de carne vacuna, aviar y porcina por habitante se expandió 100 %. En concordancia, el índice global de producción de alimentos *per cápita* creció cerca del 48 % mientras que el índice para el volumen total de alimentos se multiplicó 3,6 veces, entre los años 1961 y 2016 (Figura 11; FAO, 2020).



Figura. 8: Población en millones de personas (círculos verdes) y producción anual de cultivos en millones de toneladas (círculos amarillos) en el mundo entre 1961 y 2018. La producción de cultivos incluye cereales, soja, girasol, palma, maní, raíces, tubérculos, hortalizas, nueces, frutas y legumbres secas. Elaborado a partir de FAO (2020) y UN (2019). Incluye alimento humano y animal.



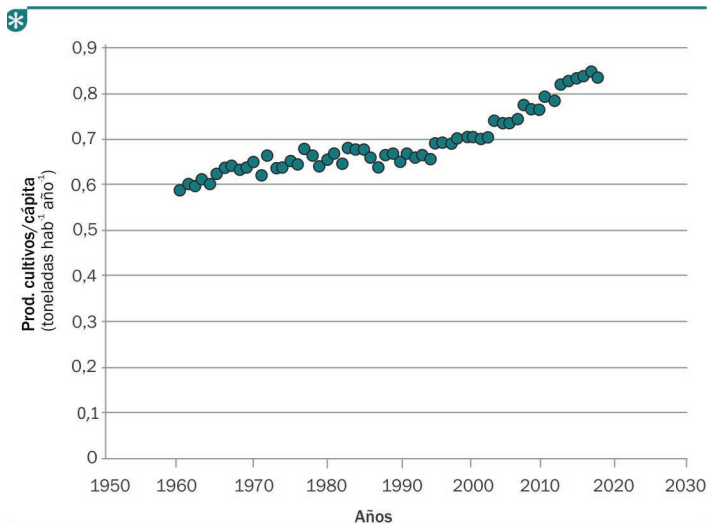


Figura. 9: Producción anual de cultivos *per cápita* en el mundo entre 1961 y 2018. La producción incluye cereales, soja, girasol, palma, maní, raíces, tubérculos, hortalizas, frutas y legumbres. Elaborado a partir de FAO (2020) y UN (2019).

No obstante, existen disparidades en el mundo en relación con estas variables. Si bien la producción total creció, África presenta menores valores de disponibilidad de alimentos *per cápita* que el resto del mundo (Figura 10). En África subsahariana, incluso, la producción por habitante se redujo en los últimos años, por lo que la deuda en el continente más castigado no solo continúa vigente, sino que se agrava. El resto del mundo, en cambio, mostró un importante crecimiento de producción de alimentos total y *per cápita*.

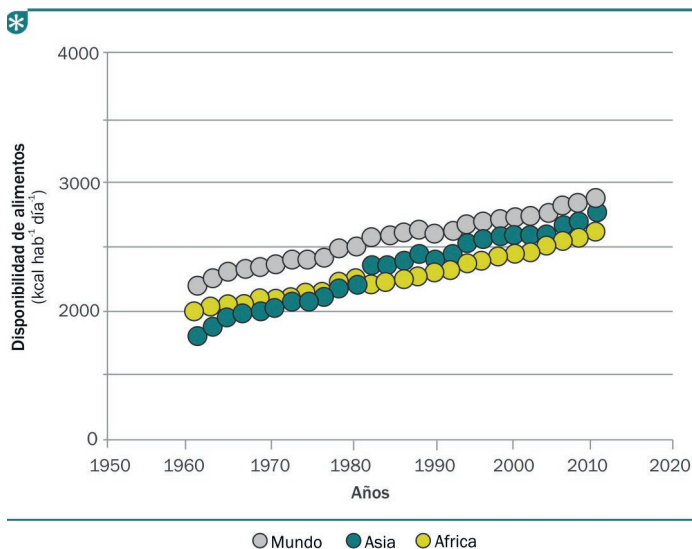


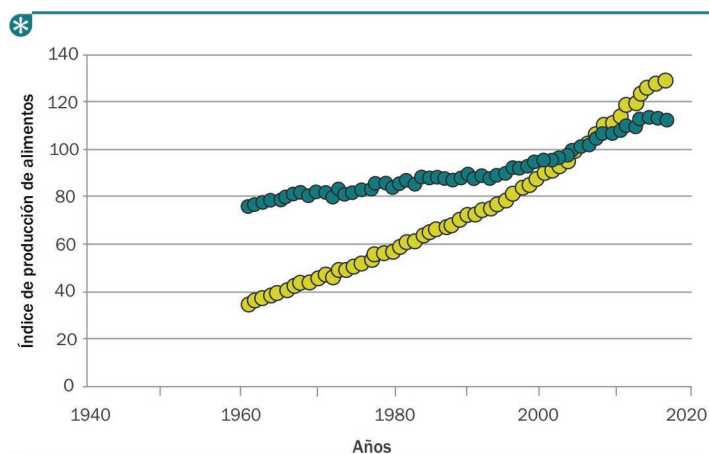
Figura. 10: Evolución de la disponibilidad de alimentos para consumo humano para el mundo, África y Asia. Datos expresados en kilocalorías disponibles por habitante y por día calculados como producción anual, más importaciones, menos exportaciones, más reducción de reservas (stocks). Los alimentos vegetales utilizados para alimentación animal no se incluyen en las kcal vegetales disponibles para consumo humano directo, sino que se transforman y luego computan como kcal de origen animal. No son kilocalorías efectivamente consumidas ya que no descuentan pérdidas y desperdicios.

La producción global de los cereales, principales cultivos de la humanidad, aumentó de alrededor de 1.000 millones de toneladas en 1960 a cerca de 3.000 millones en la actualidad (Figura 12). Esto se debió, principalmente, a una mejora de $46 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en los rendimientos promedios de cereales a nivel global, ya que la superficie cultivada se mantuvo más estable (FAO, 2020). Dicho crecimiento se aceleró a partir de los primeros años del siglo XXI (Figura 12). Algo similar se observó para la producción total de cultivos a nivel global (Figura 8).

El maíz fue el principal protagonista de estos recientes aumentos, ya que casi duplicó la producción entre los años 2000 y 2018. Para el arroz y el trigo, los otros dos cereales de importancia, el incremento en dicho periodo rondó el 30 %. La superficie cosechada creció 41 % para el maíz, solo 9 % para el arroz y se mantuvo constante en trigo. Finalmente, los rendimientos por unidad de superficie aumentaron 37, 26 y 20 % para maíz, trigo y arroz, respectivamente (FAO, 2020).

El maíz está actualmente tomando mayor relevancia en el continente africano donde su producción casi se duplicó durante el presente siglo (44 a 80 millones de t) debido a un aumento de 70 % en la superficie cosechada y de 18 % en los rendimientos por unidad de superficie (FAO, 2020). El maíz, cultivo traído de América que tuvo un rol protagónico en Europa y Asia durante los siglos anteriores, tiene hoy un gran potencial para contribuir a la seguridad alimentaria del continente africano.

Figura 11: Índices de producción bruta de alimentos total (círculos amarillos) y *per cápita* (círculos verdes) en el mundo desde 1961 a 2016. Los índices se basan en la suma de las cantidades de los diferentes alimentos producidos anualmente ponderados por su precio y expresados relativos al valor de 2004-2006 (FAO, 2020).



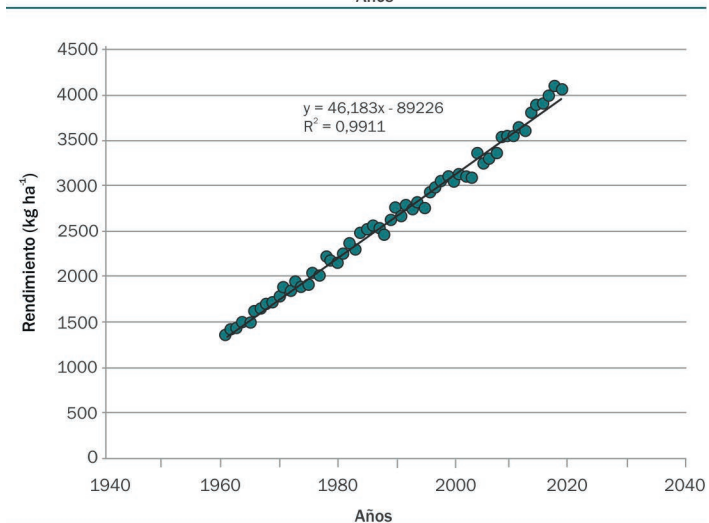
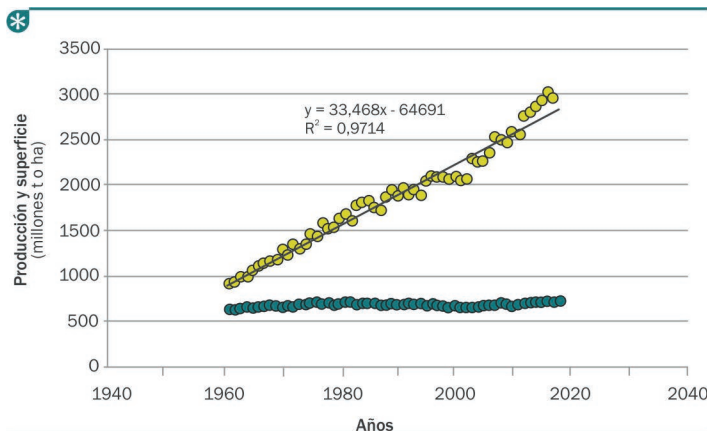


Figura 12: Evolución de la producción mundial (círculos amarillos), de la superficie cosechada (círculos verdes, panel superior) y de los rendimientos de cereales totales (panel inferior) desde los años 1960 hasta 2018 (FAO, 2020).

Sin las tecnologías de insumos asociadas con la revolución verde la producción actual por unidad de superficie sería hoy la mitad, por lo que hubiera sido necesario expandir la superficie a expensas de áreas frágiles. Esto habría ocasionado un impacto ambiental mucho más serio que el que hoy estamos experimentando (Uphoff, 2002; Bringezu *et al.*, 2010). De hecho, la cantidad de superficie cultivada *per cápita* se redujo de 0,45 a menos de 0,25 ha entre 1960 y principios del siglo XXI (Bruisma, 2009). Las innovaciones de la revolución verde en interacción con la síntesis de amoníaco a partir del nitrógeno del aire salvaron muchas más vidas que cualquier otro conocimiento, descubrimiento o invención en la historia de la humanidad (Medigo, 2020).

La revolución verde, entonces, constituye un claro ejemplo de innovación tecnológica al servicio de la producción de alimentos que postergó las predicciones malthusianas.

Hoy la tasa de crecimiento poblacional en el mundo está disminuyendo, pero no por hambrunas y causas derivadas de ellas como Malthus vaticinó. Durante las últimas décadas, la disponibilidad de alimentos aumentó en mayor proporción que la población (Figuras 9-11), lo que resultó en una caída de la proporción de desnutridos crónicos. Las importantes mejoras en alimentación de la humanidad de las últimas décadas no se asociaron con incrementos de la tasa de crecimiento poblacional. Al contrario, junto con la mejor alimentación y la mejora del nivel de vida, las tasas de fecundidad se están reduciendo marcadamente en el mundo, aunque con retrasos en los países más pobres (Figura 7). Por lo tanto, la trampa de Malthus en términos de crecimiento poblacional no se cumple.

No obstante, la trampa sigue vigente en lo relacionado con el ambiente y los recursos naturales. Nuestras formas actuales de producir los crecientes volúmenes demandados generan daños ambientales que atentan contra la futura seguridad alimentaria y constituyen una amenaza para la humanidad, por lo que es necesario evaluarlos, prevenirlos y revertirlos. Los logros en mejora de alimentación y calidad de vida no estuvieron libres de costos.

Desde 1960 al 2018, paralelamente con la notable expansión de la producción de cultivos, la producción global de fertilizantes aumentó 6,4 veces, la de plaguicidas 5,9 veces, y el uso de energía basada en combustibles fósiles para todo uso se incrementó 4,5 veces (Figura 13). La agricultura de la revolución verde es muy dependiente del petróleo. Cálculos aproximados indican que el uso anual directo e indirecto de energía de combustibles fósiles y de electricidad en la producción agropecuaria tranqueras adentro creció de 0,1 Ej (Exajoules) a casi 13 Ej durante el siglo XX. Como la superficie cosechada creció 40 % en dicho siglo, en el año 2000 una hectárea promedio de tierra de cultivos utilizó de manera directa e indirecta 93 veces más energía que en el año 1900 (Smil, 2017). Coincidentemente, Pellegrini y Fernández (2018) indicaron que el uso anual global de energía en la producción agrícola, considerando fertilizantes, combustibles, y construcción y mantenimiento de maquinaria, se incrementó de 5 a 13 Ej entre 1961 y 2014.

Los costos energéticos de transporte, procesamiento y distribución son aun mayores. Considerando todos los costos, Tiftonell (2013) calculó que se requieren 1500 litros de equivalente petróleo o 0,05 Terajoules (Tj) por año para alimentar a una persona del mundo desarrollado. La mayor parte de esta energía se utiliza en procesamiento, transporte y distribución de alimentos, maquina-

ria de campo, síntesis de fertilizantes nitrogenados y plaguicidas, riego y secado de granos.

La eficiencia de uso de energía en la producción agrícola, medida como el cociente entre la contenida en las cosechas y la utilizada en la producción creció sostenidamente desde 1980 (Pellegrini y Fernández, 2018). De acuerdo a estos autores, la eficiencia global promedio en 1960 era entre 2,5 y 3,5 según los supuestos considerados, y aumentó a valores entre 3,5 y 4,5 en la última década. En concordancia, Lema (2017) concluye que la mejora en la producción en Argentina se debió a un aumento en la productividad de todos los factores. Las mejoras en producción y eficiencia se debieron y deben, principalmente, al mejoramiento genético vegetal, a mejores prácticas de manejo y a su interacción (Sección 5.2.2.4).

Desde mediados del siglo pasado se produjeron además importantes cambios en aspectos sociales y económicos. Entre 1960 y 2017 la expectativa de vida se incrementó marcadamente, especialmente en China y países del sudeste asiático (Figura 7) y el porcentaje de la población mundial mayor de 15 años con educación básica creció al 85 % (Roser y Ortiz Ospina, 2018). Durante el siglo XX se consolidó la hegemonía de occidente; Europa Occidental y Estados Unidos llegaron a aportar el 54 % del PBI mundial a mediados de dicho siglo (Madisson, 2001; Tugore Ques, 2016) y a utilizar una alta proporción de la energía global. En el siglo XXI, no obstante, el eje se vuelve a desplazar hacia el este y sur de Asia (principalmente China) (Tugore Ques, 2016).

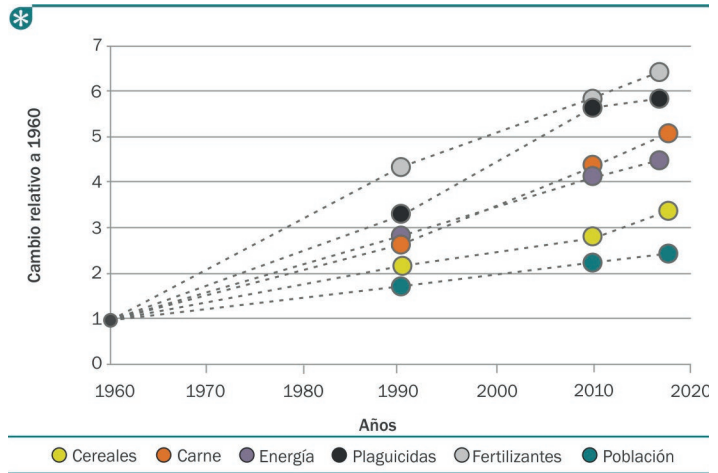
El uso de energía primaria total global creció 4,5 veces entre 1960 y 2018, valor superior al aumento poblacional, que fue de 2,5 veces. Esto significa mayores producciones y consumos *per cápita*, asociados con el desarrollo de distintas regiones del mundo. La energía total consumida en el año 2017, considerando todos los usos, fue de cerca de 14.000 millones de toneladas de equivalentes petróleo (Mtoe) o 586 Exajoules (Ej); (IEA, 2019; REN 21, 2019). El consumo anual promedio de energía primaria *per cápita* fue de 78 Gigajoules, aunque con grandes diferencias entre países.

A fines del siglo XX, los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) llegaron a representar cerca del 90 % de la matriz energética global. Además, durante el siglo XX, los motores de combustión interna y las turbinas pasaron a ser las fuentes dominantes de energía motriz (Smil, 2017). Estas máquinas han sustituido a los animales de tiro y reducido el trabajo humano en los países ricos, mientras que en los países más pobres el reemplazo fue escaso a nulo.

La situación energética podría haber tenido otro desenlace. Mouchot (1869) estudió las aplicaciones industriales del calor

solar y llegó a presentar en la Feria Internacional de París de 1878 un admirable invento que transformaba la energía solar en movimiento mecánico. Treinta y cinco años después, Frank Shuman fabricó una máquina que utilizaba energía solar para extraer agua y regar tierras del desierto en Egipto (Kryza, 2003). Pero el carbón y el petróleo abundantes y baratos evitaron que estas iniciativas prosperen. Los combustibles fósiles, entonces, se impusieron ampliamente.

Figura 13: Cambio relativo a 1960 de la producción mundial de cereales y de carne (vacuna, de cerdo y de pollo), de la población, y del uso global de fertilizantes, plaguicidas y energía total. Elaborado sobre datos de IEA (2019); FAO (2020); UN (2019); y Tilman *et al.* (2002).



Durante el siglo XX y el siglo XXI se produjeron notables progresos científicos como la teoría de la relatividad y la física cuántica, y avances tecnológicos como el automóvil, los aeroplanos, las computadoras, la robótica, la nanotecnología, la biotecnología, la inteligencia artificial, las energías renovables, entre otras. Además, el notable desarrollo de las telecomunicaciones y de la información (radio, televisión, telefonía móvil, internet, mediciones a distancia, tecnologías satelitales, informática, big data, redes sociales, etc.) ha generado un mundo ampliamente interconectado. Estas tecnologías pueden ayudarnos a alcanzar una producción sostenible y a cerrar las brechas entre el desarrollado y el subdesarrollo. No obstante, si su alcance se limita a los que más recursos tienen, podrían ser un factor de ampliación de inequidades.

Dados el desarrollo del conocimiento, el progreso tecnológico, el control de los elementos naturales, el gran uso de la energía, y las consecuencias notorias de todas las actividades humanas en el planeta, estamos actualmente transitando una nueva era geológica denominada el Antropoceno (Steffen *et al.*, 2007; Zalasiewicz *et al.*, 2011; Syvitsk *et al.*, 2020).

2.8. Síntesis

El advenimiento de la agricultura fue un paso gigante de la humanidad ya que posibilitó hábitos sedentarios que fomentaron el ocio creativo y la innovación. Desde dicho momento, la producción agrícola aumentó siguiendo el incremento en la demanda de alimentos por parte de la población. A fines del siglo XVIII, Malthus predijo hambrunas generalizadas al notar que la población humana crecía de forma geométrica. Sin embargo, la producción de alimentos creció a una tasa aún mayor. La revolución agrícola y la revolución verde constituyen claros ejemplos de capacidad de innovación en la producción agropecuaria. La primera alivió las hambrunas recurrentes de los siglos XVI, XVII y parte del XVIII; la segunda permitió alimentar poblaciones creciendo a altísimas tasas como consecuencia de la reducción de la mortalidad infantil que sucedió a los descubrimientos de Pasteur y Koch. Un dato contundente de la capacidad de innovación y del progreso tecnológico en el sector agrícola es el incremento de los rendimientos de los cultivos que se produjo entre 1960 y principios del siglo XXI, que redujo marcadamente la superficie cultivada necesaria por habitante en el mundo.

La importante intensificación de la producción agrícola basada en agroquímicos y energía, junto con el laboreo excesivo de los suelos y el avance de la frontera agropecuaria originaron problemas de degradación ambiental y de contaminación, de pérdida de biodiversidad, de emisión de gases de efecto invernadero, de disponibilidad de agua dulce, entre otros (Bringezu *et al.*, 2010; Foley *et al.*, 2005; Rockström *et al.*, 2009a; Tittonell, 2013; Ripple *et al.*, 2017; Gordon *et al.*, 2017; Springmann *et al.*, 2018; FAO, 2020; Rockström *et al.*, 2020). El impacto ambiental resultante de la actual actividad agropecuaria marca claramente la necesidad de encontrar maneras más eficientes y sostenibles para alimentar a la población.

Hoy, el desafío que enfrenta la agricultura es satisfacer las futuras demandas de alimentos en un marco de cambio climático y reducir los efectos ambientales adversos de la actividad agropecuaria, o sea desacoplar la producción del impacto ambiental, a la vez que se garantizan los ingresos y el bienestar de los agricultores.

Para alcanzar este objetivo debemos recurrir nuevamente a nuestra prodigiosa capacidad de innovación. En los próximos capítulos se describen las estrategias y tecnologías que pueden darnos las soluciones. Pero antes es necesario detallar y analizar los efectos negativos resultantes de las actividades agrícolas y estimar las futuras necesidades de alimentos y otros productos del campo.

3. IMPACTO AMBIENTAL DE LA AGRICULTURA

Los eventos de creatividad e innovación relacionados con la supervivencia y el nivel de vida de nuestra especie son cuantiosos (Capítulo 2). Las actividades humanas resultantes de dichas innovaciones y del aumento poblacional, con el consiguiente uso de los recursos naturales, crecieron de manera exponencial en las últimas décadas, lo que sumado a lo limitado de dichos recursos causaron extralimitaciones con importantes impactos ambientales. Los efectos negativos de la actividad humana sobre el ambiente son producto de la población, el nivel de consumo por habitante y las tecnologías utilizadas para sostener los consumos globales (Meadows *et al.*, 2012). No estamos realizando una buena gestión de nuestro hábitat ni de los recursos naturales, por lo que estamos poniendo en riesgo los servicios ecosistémicos (Reid *et al.*, 2015). El mundo enfrenta una amenaza sin precedentes, en cuanto al cambio climático antropogénico, la contaminación química, el agotamiento de los recursos naturales y la pérdida de biodiversidad. Hemos sobrepasado la capacidad bioproductiva del planeta.

La agricultura fue y es una de las principales actividades humanas. Como tal, ha ejercido presión sobre el medioambiente comprometiendo los recursos y la futura producción de alimentos en cantidad y calidad.

El notable incremento de la producción evidenciado a lo largo de la historia se produjo principalmente a través de la expansión de la superficie cultivada hasta mediados del siglo XX y del aumento en la intensidad de uso de insumos externos a partir de mediados del siglo pasado. Esto resultó en procesos de degradación del suelo, de pérdida de hábitats y de contaminación por la elevada, y muchas veces mala, utilización de insumos, entre los que se destacan los fertilizantes, los plaguicidas y la energía fósil.

Muchas de las prácticas hasta hoy comunes en la agricultura buscan incrementar la producción o la rentabilidad a corto plazo a nivel individual, y el autoabastecimiento y seguridad alimentaria a nivel nacional, simplificando el manejo, desconociendo los procesos inherentes a cada sistema e ignorando los posibles efectos negativos sobre el ambiente, los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria (Domínguez *et al.*, 2005; Hatfield y Sauer, 2011; INTA, 2011; Leonardi *et al.*, 2015; Andrade *et al.*, 2017; IPCC, 2019a). El sistema alimentario mundial es un impulsor y, generalmente, la primera víctima del Antropoceno (Rocks-tröm *et al.*, 2020).

Rockström *et al.* (2009a) identificaron umbrales planetarios que no debieran ser transgredidos si queremos prevenir serios daños para el ambiente. Fijaron umbrales para la concentración de CO₂ en la atmósfera, la pérdida de biodiversidad, la cantidad de nitrógeno (N₂) removido de la atmósfera y transformada en formas más reactivas para uso humano, la cantidad de fósforo (P) que fluye a los océanos, la concentración de ozono en la estratosfera, la acidificación de los océanos, la extracción de agua de ríos, lagos y acuíferos (agua azul), el uso de la tierra por los cultivos, la contaminación química, y la carga de aerosoles en la atmósfera. Los límites para las primeras tres variables ya han sido sobrepasados.

La Tabla 1 presenta, para 7 de estas variables, los umbrales, la situación actual y la original cuando comenzó la agricultura hace 10.000 años. Las variables seleccionadas son aquellas en las que la agricultura tiene un rol preponderante. La producción de alimentos es responsable de buena parte del impacto ambiental que las actividades antropogénicas tienen sobre los ecosistemas por sus aportes a la emisión de gases de efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad y la contaminación, por el uso del agua de ríos, lagos y acuíferos para riego, por el requerimiento de tierras y sus efectos sobre la degradación de suelos, por la remoción de nitrógeno del aire y por los aportes al flujo de fósforo y de otros nutrientes a aguas superficiales y profundas y a los océanos. Según Rockström *et al.* (2020), sin una transformación del sistema alimentario, el mundo no podrá cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (UN, 2015) ni con el Acuerdo Climático de París (UNCCC, 2015).

Proceso	Variables	Umbral	Valor actual	Valor original	Impacto de la agricultura
Cambio Climático	Conc de CO ₂ en la Atmósfera (ppm Vol)	350	415	<280	Medio
Pérdida de Biodiversidad	Tasa de extinción de especies (N.º por millón x año)	10	>100	<1	Alto
Ciclo del nitrógeno	N ₂ removido del aire para uso humano (10 ⁶ t/año)	35	121	0	Alto
Ciclo del fósforo	Flujo de P a los océanos (10 ⁶ t/año)	11	9	1	Alto
Uso de agua azul	Extracción por humanos (km ³ /año)	7.300	4.000	0	Alto
Aumento de tierra cultivada	Tierra libre de hielo bajo cultivos (%)	15	12-14	0	Alto
Contaminación química	Producción de pesticidas (10 ⁶ t.p.a./año)	s.d.	4	0	Medio

Tabla 1: Valores actuales, originales, y umbrales de riesgo ambiental para distintas variables indicadoras de procesos de impacto ambiental en los que la agricultura tiene un efecto preponderante. Los valores originales corresponden a los comienzos de la agricultura hace unos 10.000 años. Adaptado de Rockström *et al.* (2009a) y completado con datos de Tilman *et al.* (2002) y Shlikomanov (2000). Los valores actuales de concentración de CO₂, uso de agua azul, tierra cultivada y producción de pesticidas fueron ajustados en base a NOAA (2019); Aquastat (2019); IPCC (2019a); y FAO (2020).

En un trabajo reciente, Gordon *et al.* (2017) concluyeron que los cambios en los sistemas de producción de alimentos desde 1960 hasta la actualidad resultaron en una reducida resiliencia de la biósfera, y que se traspasaron cuatro de los seis límites de uso seguro de los recursos planetarios analizados. Los límites traspasados son los correspondientes a la biodiversidad, el cambio climático, los flujos biogeoquímicos y el cambio de uso de la tierra. Si bien los límites planetarios están relativamente bien definidos, no ocurre lo mismo para aquellos a nivel subglobal (Steffen y Stafford-Smith, 2013) y de sistemas de cultivo (Cassman y Grassini, 2020).

A continuación se presentan y discuten los efectos de la agricultura en el calentamiento global, el uso de la tierra y el agua, la pérdida de biodiversidad, la contaminación química y la degradación de los suelos. Estos efectos, a su vez, afectan negativamente la producción y comprometen la futura seguridad alimentaria.

3.1. Calentamiento global y cambio climático

El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) y la comunidad científica acuerdan en que la mayor parte del calentamiento de la tierra en las últimas décadas se debe a actividades humanas que incrementan la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera (Oreskes, 2005; IPCC 2007; Magrin, 2007; Ripple *et al.*, 2017; Cook *et al.*, 2017; IPCC, 2019a).

Los principales gases que causan el mencionado efecto invernadero antropogénico son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), que tienen una actividad relativa de efecto invernadero por molécula de aproximadamente 1, 30 y 300, respectivamente (Van den Bygaart, 2016). Las emisiones anuales de estos gases crecieron de 27 a 52 Gigatons (Gt) de equivalentes CO_2 entre 1970 y el periodo 2007-2016 (IPCC, 2019a). De los 52 Gt emitidos, el 75 % correspondió al CO_2 , el 19,5 % al CH_4 y el 5,5 % al N_2O . Las naciones que producen las mayores cantidades son China, Estados Unidos, la Unión Europea, Rusia y Japón en ese orden. En conjunto aportan cerca del 60 % de las emisiones totales. En el extremo opuesto están los países menos desarrollados que emiten cantidades muy bajas por habitante.

La concentración de CO_2 en la atmósfera, indicador del calentamiento global, superó el umbral de seguridad (Tabla 1) y lejos de estabilizarse, continúa aumentando, superando en la actualidad las 410 ppm (NOAA, 2019) y alcanzando valores record de incrementos anuales en los últimos años (Figura 14).

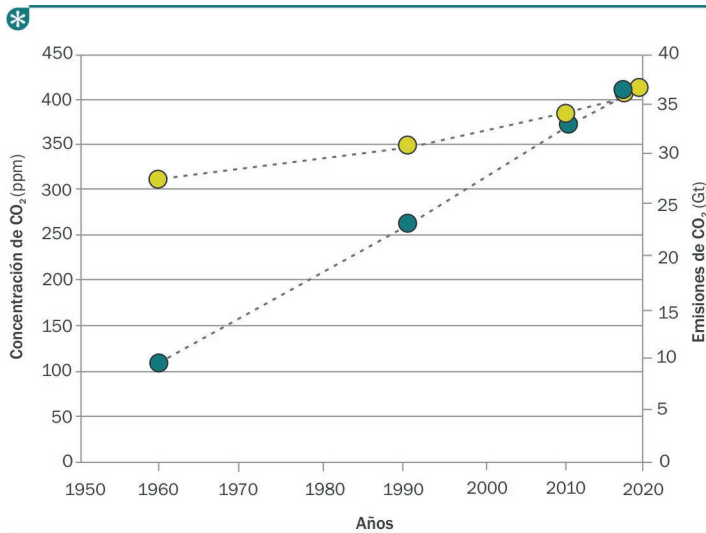
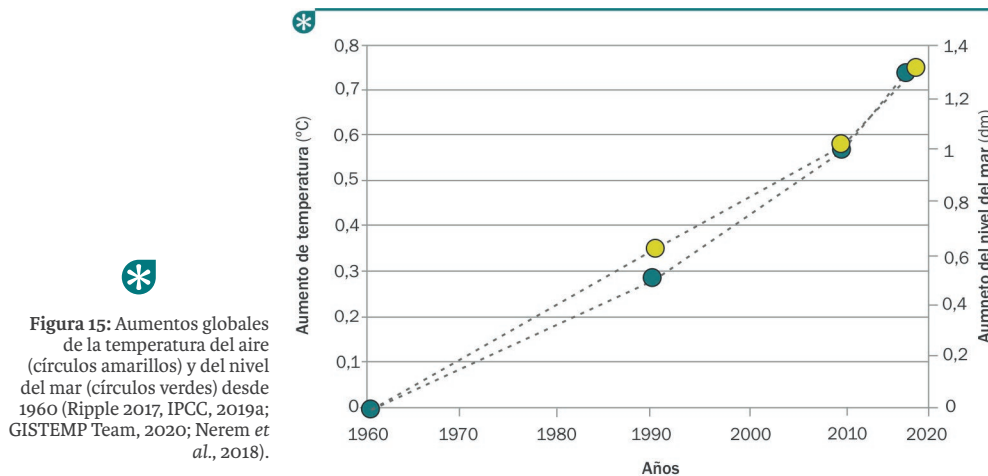


Figura 14: Concentración de CO₂ en la atmósfera (círculos amarillos) y emisiones globales anuales de CO₂ de combustibles fósiles (círculos verdes) desde 1960 hasta nuestros días (NOAA, 2019; IPCC, 2019a).

El calentamiento global y el cambio climático asociado son un grave problema para la humanidad ya que incluyen aumentos de la temperatura, cambios en los patrones de circulación y en la distribución de las precipitaciones, mayor variabilidad climática e incidencia de eventos climáticos extremos, y el derretimiento de los hielos con la consecuente elevación del nivel del mar. La temperatura superficial promedio global del aire se ha incrementado alrededor de 0,8 °C desde 1960 hasta 2018 (Ripple *et al.*, 2017; IPCC, 2019a) (Figura 15). Además, el nivel del mar está subiendo aceleradamente (Nerem *et al.*, 2018) (Figura 15); de 1993 al 2017 ascendió cerca de 80 mm, lo que representa una tasa muy superior al promedio de 1,7 mm año⁻¹ correspondiente al siglo XX. La mayor incidencia de eventos atmosféricos extremos incluye olas de calor y sequías más intensas, frecuentes y duraderas, y precipitaciones más intensas y frecuentes (IPCC, 2019a, Vos y Belu, 2019). El calentamiento global ocasiona tormentas más severas (Kossin *et al.*, 2020) dado que una mayor cantidad de energía calórica se convierte en una mayor capacidad del aire para efectuar trabajo mecánico (0,24 calorías = 1 joule).

Los efectos mencionados se asocian además con problemas de escasez de agua, erosión de suelos, pérdida de vegetación, fuegos, derretimiento del permafrost, cambio en los regímenes de los ríos, inundaciones y degradación de costas (IPCC; 2019a). Las predicciones indican que el calentamiento global continuará, in-

cluso si redujésemos considerablemente las emisiones, debido a la inercia del sistema climático.



Los cambios indicados tendrán importantes efectos en la futura producción y disponibilidad de alimentos exacerbando la inseguridad alimentaria especialmente en áreas actualmente vulnerables por hambre y desnutrición (Lobell *et al.*, 2011; Fernández, 2015; IPCC, 2019a, Vogel *et al.*, 2019). Las predicciones varían en función del método utilizado, el cultivo y la localidad.

La mayor variabilidad climática e incidencia de eventos extremos magnificaría las sequías y los excesos hídricos afectando negativamente a la producción agropecuaria. Los incrementos de temperatura reducirán los ciclos estacionales de los cultivos individuales y, por lo tanto, la radiación interceptada y su crecimiento total (Andrade *et al.*, 2005; 2010; Andrade y Satorre, 2015). Además, los golpes de calor afectarán negativamente los rendimientos (Lobell *et al.*, 2013; Rattalino Edreira y Otegui, 2012; Neiff *et al.*, 2016). Las deficiencias originadas por la mayor demanda de agua debido al aumento de la temperatura podrían compensarse con la mayor eficiencia de uso del agua resultante del incremento de la concentración de CO₂ en cultivos C₃ (Murgida *et al.*, 2014). En aquellas zonas donde el agua no es muy limitante o las temperaturas actuales son relativamente bajas, el calentamiento global resultaría en mayores rendimientos en cultivos termófilos como la soja (Andrade y Satorre, 2015) y mayores posibilidades para los sistemas de doble cultivo (Monzon *et al.*, 2014; Andrade y Satorre, 2015). Además, el aumento de la temperatura podría elevar la presión de enfermedades, especialmente en los cultivos de verano.

Según Vos y Bellu (2019), las mayores temperaturas producirían en el mediano plazo beneficios para los cultivos en altas latitudes que contrarrestarían los perjuicios en cultivos tropicales. No obstante, a partir de 2030, los efectos adversos sobre los rendimientos de los cultivos en muchas regiones del mundo se intensificarían y no serían compensados por beneficios en otras áreas. Los cultivos de países de bajos ingresos son los que mayores pérdidas de rendimiento sufrirían. Para estos países, generalmente ubicados en zonas tropicales o subtropicales, las proyecciones de rendimiento son negativas y se agravan hacia el futuro (Vos y Bellu, 2019). En contraste, las proyecciones para países de altos ingresos muestran una mayor cantidad de cambios positivos potenciales, lo que constituiría un factor de incremento de las desigualdades (Diffenbaugh y Burke, 2019).

Los ejemplos negativos más resonantes del cambio climático son el avance del desierto en los países al sur del Sahara (Senegal, Chad, Mali, Burkina Faso, Níger, Eritrea) y las inundaciones costeras de países de baja elevación como Bangladesh. A esto se suma el blanqueamiento y la muerte de los corales que alcanza el 50 % a nivel global, y que es causada por el aumento de la temperatura y de la acidez del mar, que su vez son consecuencias de las crecientes emisiones de GEI. Este proceso genera serios problemas para las poblaciones cuya subsistencia depende de la biodiversidad marina asociada con los corales.

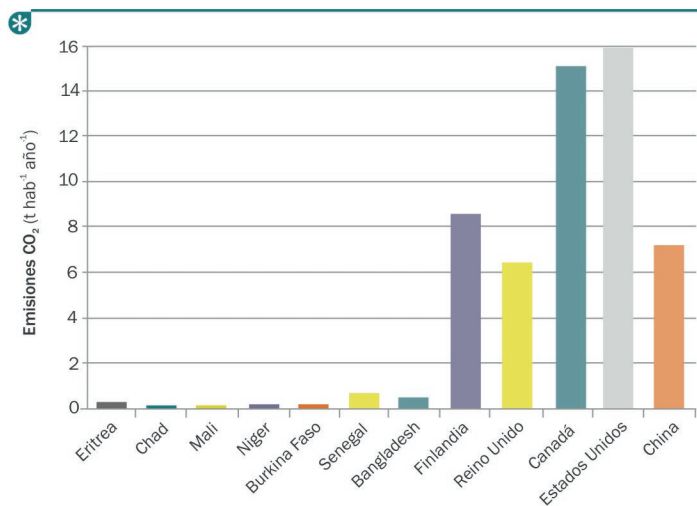
Se estima para este siglo que cientos de millones de personas emigrarán de las regiones castigadas. Paradójicamente, los países y sectores que mayores consecuencias sufren por el cambio climático son los que menos responsabilidad tienen en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero (Figura 16).

Dada la gravedad de este proceso, se requieren acciones de mitigación para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y de adaptación para que los sistemas de producción de alimentos sean más resilientes (Wheeler y Von Braun, 2013; EU, 2015).

Recientes cálculos del IPCC (2019a) indican que la agricultura, la silvicultura y el cambio de uso de la tierra aportan solamente alrededor del 23 % de las emisiones humanas netas anuales de los tres principales gases de efecto invernadero medidos como equivalentes CO_2 (13 % del CO_2 , 44 % del CH_4 y 82 % del N_2O). Este valor no contempla otras emisiones relacionadas con la producción de alimentos como el procesamiento y transporte, secado de granos, síntesis de fertilizantes, labores, etc. Incluyendo estas otras fuentes de emisiones el aporte de la agricultura se acerca al 30 % (Poore y Nemecek, 2018; IPCC, 2019a). Estas estimaciones son similares a las informadas por Foley *et al.* (2011); Olivier *et al.* (2012); y Lancet Commissions (2019).



Figura 16: Emisiones de CO₂ por habitante y por año por quema de combustibles fósiles para distintos países en el año 2014. El tamaño de la población de China lo hace el país más emisor en términos absolutos. Argentina produce cerca del 0,6 % del total mundial, en proporción a su población. No incluye emisiones de CH₄ ni de N₂O. Datos extraídos de Gapminder, 2020.



Las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero por la agricultura incluyen la fermentación de los rumiantes, las arroceras, el uso de fertilizantes y abonos, el estiércol, la quema de rastrojos, la deforestación, y el uso directo e indirecto de energía. Entre ellas se destacan por su magnitud y efecto las emisiones de CH₄ por los rumiantes, de CO₂ por deforestación y de N₂O por la aplicación de fertilizantes (IPCC, 2007; MMADSN, 2015).

Dado el rol central de la agricultura en proveer alimentos a la población las emisiones se deberían expresar por unidad de alimento producido (Grassini y Cassman, 2012; Casanave Ponti, 2021).

El reverdecimiento de la biósfera en respuesta a los cambios ambientales inducidos por las actividades humanas (efectos benéficos sobre el crecimiento vegetal natural y sobre el suelo por aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, deposiciones de nitrógeno y cambio climático) debe ser tenido en cuenta en el balance ya que representa aproximadamente 11,2 Gt anuales de equivalentes CO₂ (IPCC, 2019a).

Finalmente, los cambios en el uso y la cobertura de la tierra alteran los intercambios de energía y de humedad a nivel local, regional y global, lo que a su vez modifica las precipitaciones y la temperatura superficial, es decir, el clima (Bonan, 2008; Davidson *et al.*, 2012; IPCC, 2019a). Por ejemplo, la disminución de la superficie cubierta de bosque en zonas tropicales reduce la evapotranspiración, lo que puede resultar en días más cálidos y en mayor frecuencia e intensidad de eventos de calor. Contrariamente, en regiones boreales con cobertura de nieve estacional y algunas regiones templadas, una mayor superficie forestal resulta en calentamiento invernal por disminuir el porcentaje de radiación reflejada respecto a la radiación incidente (albedo).

En el Acuerdo Climático de París (UNCCC, 2015) se fijó como meta limitar el calentamiento global a menos de 2 °C comparado con los niveles preindustriales, para reducir los riesgos y el impacto del cambio climático. El acuerdo requiere alcanzar cero emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero para el año 2100 en un contexto de equidad, desarrollo sustentable, erradicación de la pobreza y seguridad alimentaria. Para alcanzar estos objetivos, las naciones deben fijar trayectorias de reducciones de emisiones que requieren impulsar tecnologías de producción y utilización de energías alternativas renovables y acrecentar los sumideros de carbono.

Existe un claro consenso en la comunidad científica acerca de las causas antropogénicas del cambio climático. Los especialistas en la disciplina se esfuerzan en transmitir este mensaje a la sociedad (Oreskes, 2005; Cook *et al.*, 2017). Lamentablemente, dicho mensaje no llega con la fuerza necesaria y personas con mucho poder no quieren escucharlo o desvían la atención de la población (Van der Linden *et al.*, 2017).

3.2. Pérdida de biodiversidad

La biodiversidad, entendida como la diversidad de especies de organismos vivos y la variabilidad genética dentro de ellas, cumple importantes funciones en los agroecosistemas en relación con su producción y regulación interna, y con su resiliencia, estabilidad y adaptación frente a cambios ambientales (Isbell *et al.*, 2011; Isbell *et al.*, 2015; Dainese *et al.*, 2019). Es un indicador general de la salud de un ecosistema, en cuanto a su capacidad de proveer en forma sostenida una amplia gama de servicios. Un paisaje rural diverso, así como un agroecosistema diverso, proveerá una mayor oferta y una más amplia combinación de servicios ecosistémicos en comparación con paisajes y agroecosistemas simplificados (Barral *et al.*, 2015).

La biodiversidad tiene, por lo tanto, roles relevantes en la agricultura y la alimentación. Entre estas contribuciones se destacan la formación y protección de los suelos, el secuestro de carbono, la regulación hídrica, el ciclado de nutrientes, la polinización, la regulación del clima, la regulación de eventos extremos y la regulación de plagas y enfermedades. La biodiversidad constituye además una fuente de genes para el mejoramiento genético vegetal.

La pérdida de biodiversidad ha alcanzado valores alarmantes (Barnosky *et al.*, 2011; Ceballos *et al.*, 2015). Dicha pérdida se debe principalmente a la expansión e intensificación agropecuaria, la explotación directa de organismos vivos, la contaminación, los asentamientos humanos, las invasiones, las vías de comunicación, etc. (Brook *et al.*, 2008). El calentamiento global, que en

parte se debe al cambio en el uso de la tierra, acelera la pérdida de biodiversidad (IPCC, 2019a).

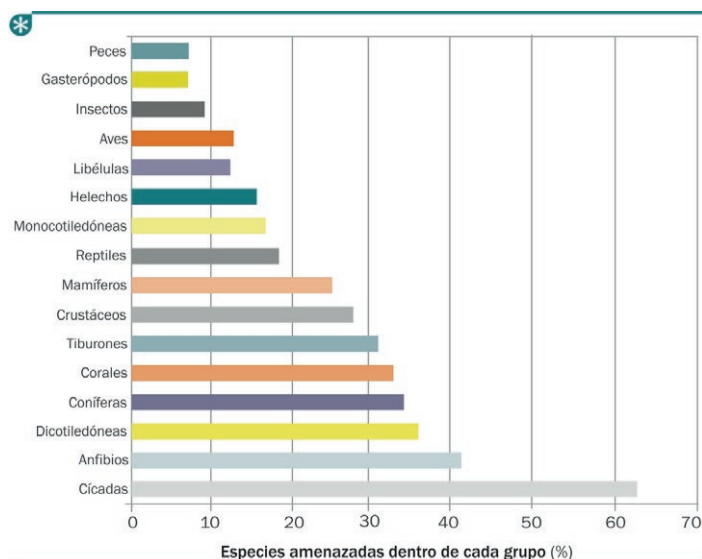
La pérdida de biodiversidad se mide a través de los cambios en la composición y diversidad de las comunidades de los ecosistemas, o sea, la tasa de extinción de especies, la proporción de especies amenazadas y las reducciones en el número de poblaciones locales y su densidad poblacional (Lancet Commissions, 2019).

Las actividades humanas han causado una importante disminución en la integridad de los hábitats terrestres a nivel global en comparación con la situación prístina (IPBES, 2019). Según esta referencia, el 75 % de los ambientes terrestres está significativamente alterado, el 66 % del área oceánica está experimentando impactos acumulativos y más del 85 % de los humedales se ha perdido. Como consecuencia de estas alteraciones, el 25 % de las especies animales y vegetales evaluadas están actualmente amenazadas por las actividades humanas y, a juzgar por la declinación poblacional, la amenaza de extinción crece marcadamente (IPBES, 2019) (Figura 17). La tasa de extinción de especies creció de 1 por millón por año en la era preindustrial a más de 100 por millón por año en la actualidad, superando ampliamente el umbral de seguridad presentado en la Tabla 1 (Rockström *et al.*, 2009a).

En base a las proporciones indicadas en la Figura 17, se estima que alrededor de 1 millón de especies están amenazadas de extinción. Otros cálculos indican que alrededor del 9 % de las especies terrestres (más de 500.000) no tienen suficiente hábitat para sobrevivir a largo plazo y están sujetas a extinción, muchas dentro de las próximas décadas a menos que se restauren sus hábitats (IPBES, 2019).



Figura 17: Porcentaje de especies amenazadas dentro de cada grupo vegetal o animal. Adaptado de IPBES (2019).



La agricultura, por avanzar sobre áreas de bosques y otros tipos de ambientes, tiene una alta responsabilidad en los incrementos en la tasa de extinción de especies. Foley *et al.* (2011) informaron años atrás que ya se habían deforestado el 45 % de los bosques templados y el 27 % de los bosques tropicales. Durante el siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, la producción agropecuaria en Europa, Asia y América del Norte creció principalmente por la expansión de la superficie cultivada a través de la deforestación.

La pérdida de biodiversidad está directamente asociada con la deforestación y la degradación de bosques (Panfil y Harvey, 2015; Barlow *et al.*, 2016). En bosques tropicales, el disturbio antropogénico puede duplicar el efecto de la deforestación en la biodiversidad (Brook *et al.*, 2008; Barlow *et al.*, 2016).

La superficie forestal total global, incluyendo bosques cultivados, se redujo 130 millones de ha entre 1990 y 2015 y actualmente ronda los 4.000 millones de ha. La superficie inicial de bosques naturales en el mundo era un 50 % mayor que este valor. La tasa de pérdida neta de superficie forestal total a nivel mundial fue 7,3 millones de ha por año en la década de 1990 y 3,3 millones de ha por año en el periodo 2010-2015 (Ripple *et al.*, 2017; FAO, 2016b). Estos valores corresponden a pérdidas netas anuales cercanas al 0,2 y 0,1 %, respectivamente.

Las principales zonas de deforestación en el mundo son las del Amazonas e Indonesia. Los principales objetivos de la deforestación son la producción de carne y soja en el Amazonas y la producción de aceite de palma en Indonesia. Argentina ocupa el 9.º lugar en el mundo en superficie deforestada en un lapso de 25 años. A nivel global, el 70 % de la superficie deforestada se destina a uso agropecuario.

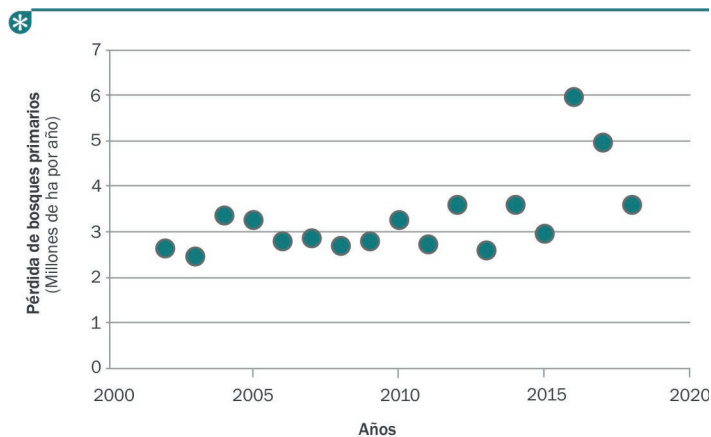


Figura 18: Pérdidas mundiales de bosques primarios tropicales (selvas) en los últimos años (GFW, 2019).

Los bosques primarios tropicales, que actualmente suman cerca de 1.200 millones de ha, pierden unos 3 millones de ha por año, aunque este valor fue ampliamente superado en 2016 y 2017 (Figura 18). En el año 2018, las mayores pérdidas de estos bosques se registraron en Brasil (1,3 millones ha), República Democrática del Congo (481.000 ha) e Indonesia (340.000 ha). Estos bosques tropicales primarios son cruciales por la biodiversidad que sustentan y por su elevado contenido de carbono en biomasa vegetal y en el suelo (GFW, 2019).

La tasa de deforestación de bosques primarios en Indonesia comenzó a declinar en 2017, y en el año 2018 fue 40 % más baja que la tasa promedio anual entre 2002 y 2016. La pérdida de bosques primarios en Brasil en 2018 se redujo en comparación con los picos asociados con incendios de los años 2016-2017. No obstante, la deforestación con fines productivos se habría vuelto a acelerar, poniendo en riesgo los logros que este país había alcanzado durante la primera década del siglo XXI, cuando la tasa de deforestación se había reducido 70 % (Nepstad *et al.*, 2014; GFW, 2019).

Los bosques proveen importantes servicios a la humanidad además de la biodiversidad. Entre ellos se destacan la regulación del clima y del ciclo hídrico, el almacenamiento de carbono, la provisión de oxígeno, la protección del suelo y la provisión de madera para diversos usos.

La satisfacción de los futuros requerimientos de productos agropecuarios tiene que ser combinada con la restauración de la biodiversidad y con la adecuada provisión de servicios ecosistémicos (Lattera *et al.*, 2011; Phalan *et al.*, 2011; Ernault *et al.*, 2013; Griggs *et al.*, 2013; Van der Ree *et al.*, 2015; Herrera *et al.*, 2017; Sáleka *et al.*, 2018; IPBES, 2019).

3.3. Uso del agua

El agua de ríos, lagos y acuíferos (agua azul) se torna cada vez más limitante para uso agrícola, doméstico e industrial (Rockström *et al.*, 2009b; Wallace y Gregory, 2002). La cantidad anual de precipitación sobre la superficie continental es de cerca de 110.000 km³. De esta cantidad, la vegetación natural evapotranspira el 56 % y los cultivos de secano el 5 %. El 39 % restante, o sea unos 43.000 km³, escurre o percola alimentando los ríos, lagos y acuíferos y constituye el volumen anual de agua azul renovable (Aquastat, 2019). Los humanos extraemos parte de este volumen para distintos usos.

La extracción anual global de agua azul por los humanos creció notablemente entre 1950 y 2000 y, aunque a menor tasa, continúa aumentando (Figura 19). Dicho valor rondaba los 500 km³

hacia el año 1900 y se ubica alrededor de los 4.000 km³ en la actualidad (Shiklomanov, 2000; Aquastat, 2019). Más del 60 % de la extracción anual actual corresponde a Asia, alrededor del 27 % a Europa y América, y solo el 6 % a África. Las extracciones de Argentina representan menos del 1 % del volumen total mundial (Aquastat, 2019).

Los valores actuales de extracción representan alrededor del 10 % de la fuente total anual de agua azul renovable y el 55 % del umbral de seguridad de 7300 km³ propuesto por Rockström *et al.* (2009a); (Tabla 1). Dicho umbral de extracción aseguraría mantener el mínimo nivel de flujo de agua en las cuencas y ríos que garanticen los servicios ecosistémicos. Algunos autores estiman que este umbral debería ser menor (Gerten *et al.*, 2013).

El consumo de agua representa algo más de la mitad de las extracciones. El resto retorna al ambiente luego de ser utilizada, aunque con una calidad inferior (Wada *et al.*, 2011). La relación entre este uso consuntivo y las extracciones es muy superior para la agricultura que para la industria y el uso doméstico. Esto se debe a que la mayor parte del agua regada es consumida en los procesos de transpiración de las plantas y evaporación del suelo.

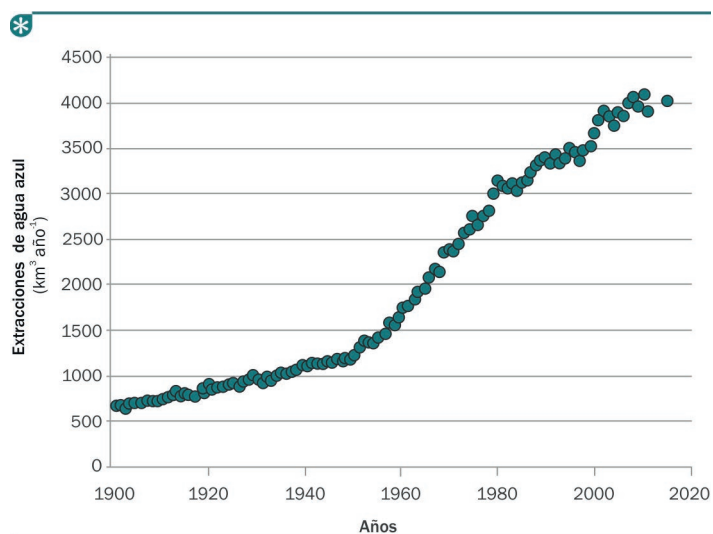


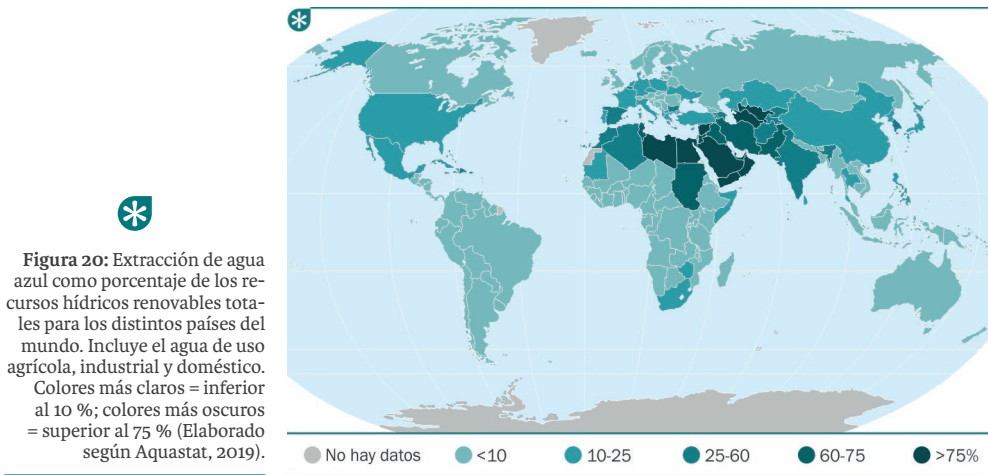
Figura 19: Extracciones anuales globales de agua azul (Ritchie y Roser, 2020).

La disponibilidad de agua azul varía marcadamente entre regiones (Aquastat, 2019). En algunos países se han alcanzado elevados niveles de estrés, medidos como la relación entre las extracciones y la disponibilidad del recurso (Figura 20); (Rockström *et al.*, 2009b; Wallace y Gregory, 2002). Países del sur de Asia y del norte de África extraen una alta proporción de sus recursos hídri-

cos renovables contrariamente a lo que ocurre en América Latina y la mayor parte de los países de África subsahariana (Aquastat, 2019). Argentina extrae solo el 4,3 % de los recursos hídricos renovables anuales.

De la extracción global del agua azul, el 69 % es utilizado por la agricultura (principalmente a través del riego), el 19 % por la industria, y el 12 % restante corresponde al uso doméstico (Shiklomanov, 2000; Molden, 2007). Estos valores, sin embargo, son muy dispares entre las distintas regiones del mundo (Figura 21). La asignación a la agricultura alcanza 81 % en África y Asia, 71 % en Latinoamérica, 60 % en Oceanía, 35 % en América del Norte y solo el 20 % en Europa (Aquastat, 2019). En las últimas dos regiones predominan el consumo industrial y el uso doméstico.

El área regada constituye el 20 % de la tierra cultivada en el mundo y aporta el 40 % de la producción global de cultivos. En China, India y en regiones áridas como Medio Oriente, norte de África y Asia Central, los agricultores utilizan anualmente una alta proporción del agua azul disponible generando problemas de sobreexplotación y de escasez (Aquastat, 2019). En Argentina, se riega solo el 5 % de la superficie de cultivos (Aquastat, 2019).



Debido a las limitaciones de agua y tierra existentes en muchas partes del mundo, la tasa de expansión de la superficie agrícola bajo riego está disminuyendo marcadamente. Se proyecta que el área equipada para riego aumente globalmente solo 0,1 % anual, pasando de 317 millones de hectáreas en 2009 a 337 millones en 2050 (FAO, 2017; Vos y Bellu, 2019).

Las fuentes de agua azul sufren además procesos de contaminación por residuos industriales y municipales y por aplicación de excesos de agua de riego con cargas importantes de sales y contaminantes. Algunas de estas aguas (aguas grises) pueden ser reutilizadas para riego de producciones sin consumo directo, mientras que otras con mayor nivel de contaminación (aguas negras) no, al menos desde el punto de vista de su viabilidad económica (Shiklomanov, 2000). El consumo de agua no adecuada origina enfermedades que producen millones de muertes por año.

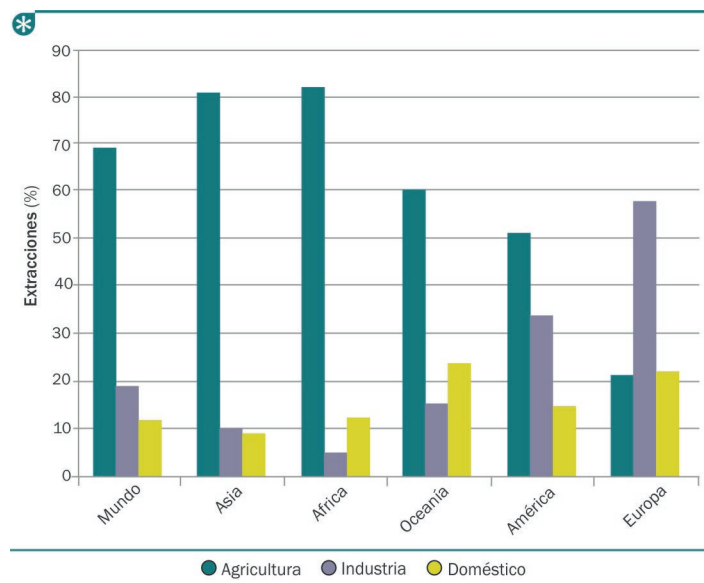


Figura 21: Porcentaje de las extracciones de agua azul renovable destinadas a la agricultura, la industria y el uso doméstico en el mundo y en los cinco continentes (Adaptado de Aquastat, 2019; Pastore, 2018). Los valores destinados a agricultura difieren entre América del Norte (35 %) y Latinoamérica (71 %).

Otros problemas derivados del uso del agua del riego son: i) los excesos de agua aplicada que recargan el acuífero freático y que pueden generar un proceso de salinización secundaria seguido de sodificación que reduce la capacidad productiva de los suelos irrigados de las regiones áridas y semiáridas, ii) los excesos que superan la capacidad de drenaje de los suelos y que generan problemas locales de anegamiento afectando la producción y las condiciones de vida de la población, y iii) el riesgo de sodificación de los suelos en el riego suplementario (Prieto, 2017).

La disponibilidad promedio global de agua azul renovable por habitante y por año se ha reducido sostenidamente desde 1960 hasta nuestros días (Figura 22). Más de 2000 millones de personas en 80 países sufren en la actualidad problemas de moderada a severa

escasez de agua tanto en lo referido a la cantidad como a la calidad del recurso, aunque este valor es sustancialmente superior si se considera escasez al menos en un mes del año (Mekonnen y Hoekstra, 2016). Se calcula además, que el 40% de la población rural mundial habita en cuencas donde el recurso hídrico es limitante (FAO, 2016).

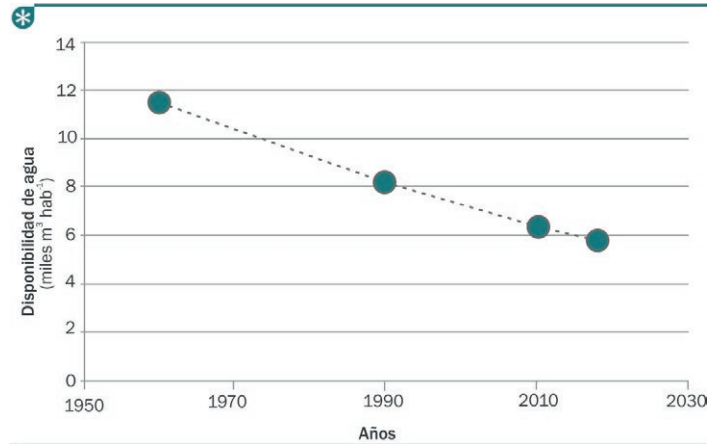


Figura 22: Disponibilidad global de agua azul renovable por habitante y por año desde 1960 hasta nuestros días. (Extraído de Ripple *et al.*, 2017).

Se estima que esta situación se agravará en el futuro. La cantidad de personas con problemas de escasez de agua azul crecería considerablemente y alcanzaría el 60 % de la población mundial en el año 2050 (Wallace y Gregory, 2002; Rockström *et al.*, 2009b).

Los problemas de escasez y de contaminación de agua afectan y afectarán mayormente a los más pobres. En el futuro los porcentajes de utilización por la agricultura decrecerán por los aumentos de otros usos, principalmente el doméstico y el industrial (Shiklomanov, 2000).

Teniendo en cuenta la tendencia de menor disponibilidad de agua, y que este recurso es esencial para la vida y constituye el principal factor limitante para los rendimientos de los cultivos, se resalta la necesidad de concentrar esfuerzos para optimizar su uso.

3.4. Contaminación química

La contaminación química se produce principalmente por residuos radiactivos, contaminantes orgánicos persistentes, metales pesados, halógenos y otros productos inorgánicos (Schwarzenbach *et al.*, 2010). En la actualidad hay más de 140.000 productos

químicos registrados. El mayor impacto sobre la salud humana y de los ecosistemas corresponde a la industria pesada, seguida por la agricultura, otras industrias y la minería. La agricultura contamina el ambiente a través del uso de plaguicidas y de la alteración de los ciclos de los nutrientes.

3.4.1. Plaguicidas

Del total de productos químicos registrados, unos 20.000 corresponden a plaguicidas. Estos últimos incluyen algo más de 1.000 principios activos, con un volumen global anual de producción que se multiplicó muchas veces desde el inicio de los registros en 1960 hasta hoy y que creció de 2,3 millones a alrededor de 4 millones de t de principio activo entre 1990 y 2017 (Tilman *et al.*, 2002; UNEP, 2013; Rosegrant *et al.*, 2014; FAO, 2020; Figura 23). En los últimos años, no obstante, se observa una estabilización en la cantidad utilizada de estos productos (Figura 23).

Los primeros plaguicidas de amplio uso fueron el insecticida DDT y el herbicida 2,4-D, que se difundieron desde fines de la Segunda Guerra Mundial. Del volumen actual de producción, algo más de la mitad corresponde a herbicidas, cerca de un tercio a insecticidas y el resto principalmente a fungicidas.

El promedio mundial de uso de plaguicida anual por ha alcanza 2,7 kg de principio activo y, en términos generales, los valores más altos corresponden a países de Europa y América, China, Japón y Malasia, y los más bajos a África, los países nórdicos y al resto de los países de Asia. Argentina aplica por ha más del doble del promedio mundial (FAO, 2020).

Los plaguicidas son sustancias químicas líquidas o sólidas que producen efectos tóxicos agudos y crónicos sobre ciertos organismos y que se utilizan principalmente para combatir las plagas (malezas, insectos, otros animales y enfermedades) que afectan a los cultivos (Bedmar, 2011). A nivel global, estos productos reducen cerca del 50 % las pérdidas potenciales en los cultivos causadas por las adversidades bióticas en su conjunto (Tabla 2; Oerke, 2006; Bedmar 2011). Los mayores controles corresponden a las malezas, luego a los insectos y por último a las enfermedades (Oerke, 2006).

El uso de pesticidas tuvo un rol relevante en la revolución verde y en las tecnologías de insumos que primaron durante las últimas décadas. Sin embargo, estas tecnologías, por su volumen y mala utilización, contaminan el ambiente, dañan la salud, afectan especies benéficas y generan resistencia en las plagas.



Figura 23: Uso de plaguicidas en el mundo y en sus distintos continentes entre los años 1990 y 2017. Datos en millones de toneladas de principio activo (FAO, 2020).

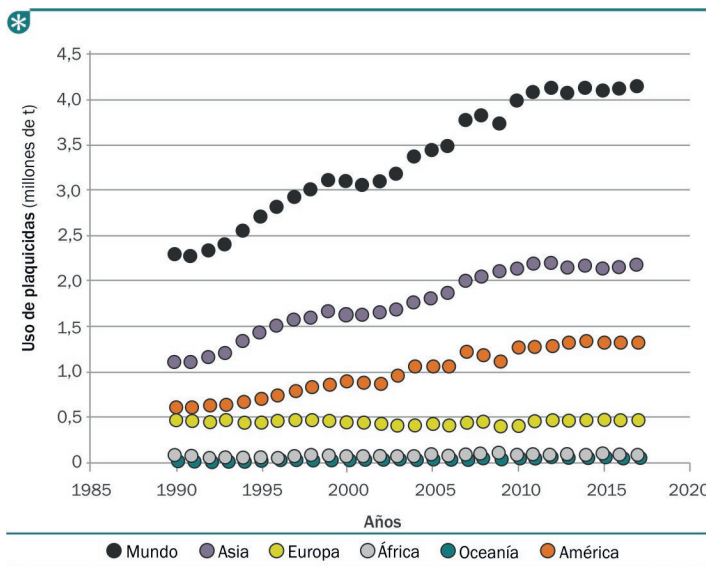


Tabla 2: Pérdidas de rendimiento globales potenciales y reales en porcentaje (%) por adversidades bióticas. Datos para trigo, maíz, arroz, soja, papa y algodón. Las pérdidas reales son luego del control con plaguicidas. El control de malezas incluye labores mecánicas. Datos de Oerke (2006).

	Pérdidas	
	Potenciales	Reales
Malezas	34	9
Insectos	18	10
Enfermedades	16	12
Totales	68	31

Conocemos el modo de acción de los plaguicidas sobre las especies a controlar, pero es necesario profundizar el estudio de su impacto en el ecosistema y en la salud humana, sobre todo a largo plazo.

Los plaguicidas son cada vez más activos en dosis bajas, menos tóxicos (considerando toxicidad aguda), menos persistentes dependiendo del tipo de producto y, por lo tanto, más seguros comparados con los más antiguos (Viglizzo *et al.*, 2011). Sin embargo, mayor seguridad se da en los países desarrollados y no en aquellos en vías de desarrollo debido a deficiencias en el proceso de aplicación y en el control de uso.

Los plaguicidas están presentes en el aire, en el suelo, en el agua superficial y subterránea y en los alimentos, y son la principal fuente de contaminación no puntual del medioambiente (Larsen *et al.*, 2013; Aparicio *et al.*, 2015; Colombo y Sarandón, 2015). Debido a esta amplia presencia en matrices ambientales, afectan la salud humana y animal, a los insectos benéficos, y a las comu-

nidades microbianas (Wolansky, 2011; Tittonell, 2013; Aparicio *et al.*, 2015). Debido al nivel de toxicidad, al volumen, y muchas veces al mal uso de plaguicidas, se observan daños a anfibios y aves, organismos indicadores de la salud ambiental (Sparling *et al.*, 2001; Zaccagnini, 2006; Violini, 2009; INTA, 2011). Si bien hay estudios sobre toxicidad de muchas sustancias, se desconocen los efectos sinérgicos entre estas o los efectos sobre poblaciones de individuos de distintas condiciones de salud (Wolansky, 2011). Además, poco se conoce acerca de sus efectos crónicos (a largo plazo) y de sus interacciones con otros factores de riesgo.

Como ejemplo del impacto de los plaguicidas en el ambiente se menciona a continuación el caso de la Argentina. La actividad agropecuaria argentina demandó, en la campaña 2011-2012, 335 millones de litros o kg de formulados de agroquímicos, siendo el glifosato el compuesto más utilizado, seguido por los piretroides y los fungicidas. Relevamientos en arroyos, ríos, aire y suelos de distintos lugares del país, en los que se evaluaron glifosato y su principal producto de degradación (AMPA), piretroides totales, fungicidas, endosulfán, clorpirifós y otros agroquímicos, indican alta frecuencia de presencia y concentraciones en agua que suelen superar los umbrales establecidos por algunos países desarrollados (Aparicio *et al.*, 2013; Aparicio *et al.*, 2015; Colombo y Sarandón, 2015). La Unión Europea establece un límite máximo de $0,1 \mu\text{g l}^{-1}$ por molécula y de $0,5 \mu\text{g l}^{-1}$ para la suma de moléculas detectadas en agua para consumo humano, mientras que la Environmental Protection Agency (EE. UU.) fijó una concentración máxima de atrazina en el agua para consumo de $3 \mu\text{g l}^{-1}$ (Aparicio *et al.*, 2015).

En relación con estos temas, los cultivos intensivos son de especial interés y sensibilidad para la sociedad por su cercanía a los centros poblados y por las elevadas cantidades de agroquímicos que en ellos se aplican.

Los problemas asociados con la aparición de resistencias a plaguicidas y con las tecnologías utilizadas para el control de malezas, plagas y enfermedades fue un signo destacado de los últimos años. Desde finales de la primera década del siglo XXI al presente se han reportado en Argentina cerca de 30 biotipos de malezas resistentes a herbicidas, al menos dos especies de insectos resistentes a eventos transgénicos y casos de enfermedades resistentes a fungicidas de amplio uso (Satorre y Andrade, 2020). Un modelo agrícola simplificado y en expansión basado en tecnologías de bajo costo, amplia difusión y generalmente mal utilizadas ha sido el factor determinante de la aparición de dichas resistencias. Las tecnologías usadas incorrectamente sucumben ante los mecanismos evolutivos de las plagas (Satorre y Andrade, 2020). Estos procesos se observaron desde los momentos en los que se utilizaron por primera vez productos químicos sintéticos para el control de plagas. Tal fue el caso de la resistencia a Verde de París por parte

del escarabajo de la papa en la Europa del siglo XIX (Mann, 2013). Este problema, sin embargo, no es exclusivo de los plaguicidas, ya que toda tecnología que afecta la probabilidad de éxito en la reproducción o supervivencia de una especie tiene el potencial de aumentar la resistencia en su progenie (Levine *et al.*, 2002).

Los datos presentados marcan la necesidad de profundizar los estudios de monitoreo ambiental, ampliando el número de relevamientos y de plaguicidas evaluados, y de encontrar maneras más eficientes y alternativas de control de las adversidades bióticas de los cultivos.

3.4.2. Alteración del ciclo de los nutrientes

La producción y el consumo de alimentos, asociados con el inadecuado uso de fertilizantes, han alterado el flujo de los elementos en la naturaleza (ciclos biogeoquímicos) y causado contaminación (Sutton *et al.*, 2013).

Globalmente se aplican cerca de 200 millones de t de fertilizantes sintéticos nitrogenados, fosforados y potásicos (medidas como N, P_2O_5 y K_2O) (Figura 24) siendo Asia el continente que más consume fertilizantes. China, India, Estados Unidos y Brasil, en orden decreciente, son los principales países consumidores (60 %). En China, India y algunas regiones de Estados Unidos y Europa se aplican fertilizantes en exceso produciendo contaminación, mientras que en otros países (Argentina, por ejemplo) los balances de nutrientes son negativos, lo que contribuye a la degradación de los suelos por pérdida de fertilidad (Townsend y Howarth 2010; Sutton *et al.*, 2013). La adición constante de nitrógeno (N) y de fósforo (P) a los suelos a través de la fertilización presenta eficiencias de uso muy bajas (Sutton *et al.*, 2013) causando contaminación e ineficiencias energéticas. Globalmente, solo el 47 % del N reactivo aplicado actualmente como fertilizante es convertido a productos cosechables (Lassaleta *et al.*, 2014), lo que indica el alto volumen de pérdidas de este nutriente al ambiente. No obstante, este porcentaje fluctúa desde valores tan bajos como 25 % en China hasta 65 % en América del Norte (Zhang *et al.*, 2015; Cui *et al.*, 2018). El caso de China es muy serio debido a que aplican en promedio $305 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, valor muy superior al promedio mundial ($74 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). En Argentina, la cantidad de fertilizante aplicado por ha (N, P_2O_5 , K_2O) es inferior a la mitad del promedio mundial (FAO, 2020).

El principal factor determinante de estas decisiones y, por lo tanto, del balance de nutrientes es la rentabilidad. En este sentido, los mayores excesos se producen en situaciones en las cuales el costo del fertilizante es bajo en comparación con el valor del producto, por ejemplo, en cultivos intensivos como frutales y hortícolas (Jobbagy y Sala, 2014) o en cultivos subsidiados.

La agricultura alteró considerablemente el flujo de N_2 atmosférico a N reactivo y el flujo de P a los océanos. La elaboración de fertilizantes nitrogenados para la agricultura y la fijación biológica por los cultivos leguminosos son las principales vías de producción de compuestos nitrogenados reactivos a partir de la remoción de N_2 atmosférico (Galloway *et al.*, 2003; Rockström *et al.*, 2009a). Los umbrales de seguridad de este proceso han sido superados ampliamente (Tabla 1). Entre los problemas que origina (Sutton *et al.*, 2013) resaltan i) la acumulación de nitratos en las napas (Hallberg, 1987; Aparicio *et al.*, 2008) con sus efectos en la salud, ii) las emisiones de amonio y principalmente óxido nitroso (N_2O) a la atmósfera (Mosier *et al.*, 1998), gas con fuerte efecto invernadero, y iii) los flujos de N a los ríos, lagos y mares con la consecuente eutrofización (Poore y Nemecek, 2018). Además, la elaboración de fertilizantes nitrogenados es muy costosa en cuanto a utilización de energía fósil y emisiones de gases de efecto invernadero (Gellings y Parmenter, 2004).

La agricultura y el posterior consumo son los principales determinantes del flujo de fósforo a los océanos (Rockström *et al.*, 2009a) a través de la extracción del nutriente del suelo y de los fertilizantes por parte de los cultivos y de la producción de dese-

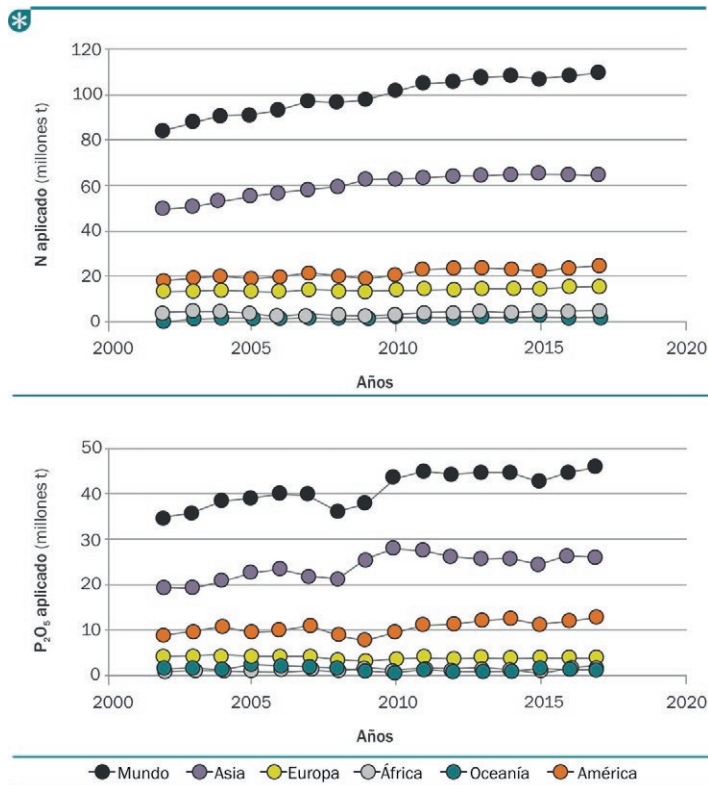


Figura 24: Fertilizante nitrogenado y fosfatado de síntesis química aplicado en el mundo y en los 5 continentes, expresado como millones de t de N y de P_2O_5 , respectivamente (FAO, 2020).

chos por los humanos y animales. El P también se pierde desde los suelos a las aguas por erosión, escurrimiento superficial y, en menor medida, lixiviación (Sims *et al.*, 1998; Sharpley *et al.*, 2013).

Los flujos de N, P y otros nutrientes a los ríos, lagos, embalses y mares producen eutrofización, proceso que altera la estructura y funcionalidad de los ecosistemas y reduce la biodiversidad, generando incluso extensas zonas muertas por hipoxia (Diaz y Rosenberg, 2008). Según Poore y Nemecek (2018), la producción de alimentos genera el 78 % de la eutrofización a nivel mundial.

Surge de esta información, la imperiosa necesidad de recircular los nutrientes, de incrementar la eficiencia de captura y de uso, y de aprovechar en mayor medida la fijación biológica de nitrógeno.

3.5. Degradación de los suelos

La actividad agrícola es la principal responsable del aumento de la tierra cultivada y de la degradación de los suelos. Hoy se cultivan más de 1.500 millones de ha (Sección 5.2.1) lo que representa un 12 % de la tierra libre de hielo del planeta, valor cercano al umbral de seguridad propuesto por Rockström *et al.* (2009a) (Tabla 1). Las tierras de pastoreo que incluyen pastizales, sabanas y matorrales suman 4.800 millones de ha. En total, incluyendo la superficie de extracción de madera y leña de bosques y las tierras de urbanización e infraestructura, los humanos utilizamos de distintas maneras más del 70 % de la superficie terrestre libre de hielo (IPCC, 2019b).

Según UNEP (2014), la superficie degradada como resultado de las actividades humanas asciende a 1.900 millones de hectáreas, de las cuales 1.200 millones están seriamente afectados y son de difícil recuperación. No obstante, las distintas estimaciones varían notablemente según los autores y según la región considerada (Bringezu *et al.*, 2010; UNEP, 2014; De Long *et al.*, 2015; Gibbs y Salmon, 2015; IPCC, 2019b).

De los suelos estrictamente agrícolas (sin considerar pasturas permanentes, bosques y tierras no productivas) el 38 % está degradado. La tasa de degradación de tierra arable en las últimas décadas supera los 5 millones de hectáreas por año (UNEP, 2014; Scherr 1999). Las regiones y países del mundo que presentan los mayores problemas de degradación de sus suelos son el sudeste asiático, China, India, norte de África subsahariana, Medio Oriente, Europa oriental, centro de Estados Unidos, Centroamérica y algunos sectores de Sudamérica (Figura 25).

Los procesos de degradación de suelos afectan a unos 2.000 millones de personas, de las cuales el 95 % vive en países en vías de desarrollo (Le *et al.*, 2016; Barbier y Hochard, 2018). La degradación de este recurso de naturaleza no renovable representa un

grave problema para la humanidad y compromete la seguridad alimentaria futura.

La agricultura, la deforestación y el sobrepastoreo son las tres principales actividades que causan degradación de suelos, con contribuciones similares a nivel global (Oldeman *et al.*, 1992). Los suelos se degradan por erosión, pérdida de materia orgánica y fertilidad, pérdida de estructura, compactación, encostramiento y sellado, salinización, acidificación, sodificación, desertificación, inundación y contaminación, entre otras causas. Estos factores presentan fuertes interacciones entre sí.

Los procesos de degradación, por alterar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reducen el crecimiento de las plantas y la biodiversidad y, por lo tanto, afectan la productividad agropecuaria.

La erosión hídrica y eólica son las principales causas de degradación de los suelos. Su escasa o nula reversibilidad es indicadora de la gravedad de estos procesos. La erosión hídrica es favorecida por las labranzas, por cultivar suelos con pendientes y por dejar los suelos desprotegidos sin cobertura durante los barbechos. La pérdida de materia orgánica y de estabilidad estructural en los suelos promueven menores tasas de infiltración y mayores escurrimientos superficiales favoreciendo así la erosión (Álvarez *et al.*, 2014a; Taboada, 2017; Gaitán *et al.*, 2017a). La erosión eólica resulta principalmente del sobrepastoreo y de la labranza de los suelos en zona áridas (Gaitán *et al.*, 2017b).



Figura 25: Mapa de degradación de suelos en el mundo. De los colores más oscuros a los más claros corresponden suelos muy degradados, degradados, estables y sin vegetación, respectivamente. Adaptado de WWF (2016).

Globalmente, a principios del siglo XXI, 1.100 millones de hectáreas estaban afectadas por erosión hídrica y 550 millones de hectáreas por erosión eólica. De estos totales, el 69 y el 54 %, respectivamente, estaban severamente afectados (Lal, 2003; UNEP, 2014). Se estima que las pérdidas anuales de tierras agrícolas por

erosión suman de 2 a 5 millones de ha (Bringeru *et al.*, 2010). Borrelli *et al.* (2017) concluyen que existe un aumento potencial de la erosión global producido principalmente por la expansión de la tierra de cultivos. Los mayores aumentos se predicen para los países menos desarrollados.

La pérdida de materia orgánica de los suelos agrícolas se debe a las labranzas, a los cambios de uso de la tierra (deforestación y avance de cultivos sobre pastizales), a inadecuadas rotaciones, a aportes de rastrojos escasos y de baja calidad (ej. monocultivo de soja), a la baja reposición de nutrientes y a la erosión. Los suelos cultivados del mundo perdieron entre el 20 y el 60 % de la materia orgánica original (IPCC, 2019b). En la región pampeana argentina, dicha pérdida es en promedio del 27 %, pero alcanza valores superiores al 50 % en aquellos suelos con prolongada historia agrícola (Sainz Rozas *et al.*, 2011). Paralelamente a la disminución de la materia orgánica, los suelos han reducido los niveles de disponibilidad de P, Zn, Ca y cationes intercambiables, y han aumentado su acidez (Sainz Rozas *et al.*, 2011). Otros ejemplos de balances negativos de materia orgánica y de pérdida de fertilidad se dan en los suelos de Australia (Angus y Grace, 2017) y África subsahariana, en la cual el déficit es crónico (Van Ittersum *et al.*, 2019).

La caída de materia orgánica ocasiona mayor susceptibilidad a la erosión y mayor dependencia del aporte de nutrientes por fertilización. Además, la degradación de los suelos reduce la infiltración de agua por pérdida de estabilidad estructural y compactación superficial y, por lo tanto, afectan negativamente los procesos de almacenamiento, redistribución y consumo del recurso hídrico (Taboada, 2017), lo que tiene importantes implicancias en el rendimiento de los cultivos.

El avance de la frontera agrícola sobre selvas, bosques y pastizales naturales expone a suelos frágiles a procesos de degradación. Además, el reemplazo de pastizales y bosque nativos por cultivos anuales como la soja reduce el agua consumida por evapotranspiración a aproximadamente la mitad, generando excesos hídricos (Caviglia *et al.*, 2013) que producen problemas de erosión, elevación de napas freáticas, salinización, inundación, y contaminación. Esto es agravado por los problemas de reducción de infiltración en suelos degradados y por la mayor incidencia de precipitaciones extremas debida al calentamiento global.

Tal como fuera presentado en los puntos anteriores, la deforestación causa reducciones de stocks de carbono y afecta directamente los balances de agua y energía y, por lo tanto, el clima.

En zonas áridas y semiáridas, la desertificación, producto de las actividades humanas y del cambio climático, es la principal vía de degradación de los suelos. El rango y la intensidad de este proceso

han crecido en las últimas décadas (IPCC, 2019c). Según el IPCC, los puntos críticos de desertificación, entendidos como aquellos en los que se observaron reducciones en la productividad de la vegetación entre la década de 1980 y la del 2000, se extienden al 9,2 % de las zonas secas comprometiendo en el año 2015 a unos 500 millones de personas, especialmente de África Subsahariana, del Medio Oriente, y de otros países de Asia. Las zonas secas, definidas como aquellas que presentan balances hídricos negativos (evapotranspiración mayor que precipitación) cubren alrededor del 46 % de la superficie terrestre total (IPCC, 2019c). La cantidad total de personas que sufren del proceso de desertificación aumentó 200 % con respecto a 1961 (IPCC, 2019a).

El sobrepastoreo es una de las principales causas de desertificación y erosión en el mundo, principalmente en África y en Asia. Es consecuencia de la aplicación de una carga ganadera superior a la permitida por la oferta forrajera y por la estabilidad de los suelos, y resulta en la desaparición de los pastos y en procesos de erosión y desertificación al quedar el suelo descubierto (Gaitán *et al.*, 2017 a, b). Además, el sobrepastoreo, junto con la deforestación, afecta la capacidad reguladora de las cuencas hídricas produciendo erosión e inundación. La desertificación es además promovida por el corrimiento de la frontera agrícola y la presión poblacional.

Otros factores que producen degradación de los suelos son las inadecuadas rotaciones y los monocultivos, las malas prácticas de riego que producen salinización y sodificación, la quema de rastrojos, la no reposición de nutrientes, etc. Por otro lado, el exceso de fertilización nitrogenada es un importante factor de acidificación de los suelos (Guo *et al.*, 2010; Poore y Nemecek, 2018).

Los procesos de degradación de los suelos son potenciados por el cambio climático (IPCC 2019b). En algunas regiones, los aumentos de temperatura, los vientos más intensos y la disminución de lluvias favorecen los procesos de desertificación y erosión eólica. En otras, las lluvias intensas, los excesos hídricos, la elevación del nivel del mar, entre otros factores, promueven procesos de erosión hídrica, inundación y salinización. Además, la degradación de los suelos contribuye al cambio climático principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero asociados con la reducción de stocks de carbono y por los cambios de cobertura vegetal. Estas interacciones constituyen claros ejemplos de retroalimentación de efectos negativos.

Finalmente, los procesos de degradación de suelos en sinergia con el cambio climático tienen fuertes implicancias en la seguridad alimentaria, principalmente de aquellas personas que dependen en gran medida de los recursos naturales para subsistir.

En síntesis, la agricultura tiene profundos efectos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. En la Sección

5.2.1 se describen las estrategias para frenar y revertir los procesos de pérdidas y deterioro de las tierras productivas.

3.6. Producción de residuos y desechos

En la antigüedad, el uso de materiales por parte de los seres humanos era restringido y los residuos se reciclaban fácil y naturalmente. Hoy, el consumo es en muchos lugares excesivo y produce desechos que se acumulan en vertederos y en otras partes del ambiente generando problemas de contaminación.

En el mundo se generan anualmente unos 2.000 millones de toneladas de desechos sólidos municipales compuestos por vidrio, papel y cartón, restos orgánicos de origen biológico, plásticos, textiles sintéticos, metales, madera, escombros, residuos tecnológicos, etc. Estos se generan principalmente por el uso doméstico, el comercio y la industria. Al menos el 33 % de ellos no se gestiona para reducir el riesgo ambiental. El World Bank (2018) estima que la cantidad de desechos mundiales aumentará 70 % en las próximas tres décadas debido al crecimiento poblacional, el desarrollo económico y la urbanización, alcanzando los 3.400 millones de toneladas anuales.

También se generan desechos muy peligrosos como los radiactivos, los sanitarios, los patológicos, los metales pesados, sustancias corrosivas y otros contaminantes.

La generación de desechos está relacionada con el desarrollo económico de los países. Los países de altos ingresos que albergan el 16 % de la población mundial generan el 34 % de los desechos globales. El mayor aumento de la producción de desechos se prevé para los países de ingreso mediano/bajo debido al desarrollo económico y al crecimiento de la población. La acumulación de desechos de todo tipo refleja una sociedad de consumo y de excesos con poca capacidad de reutilización, reciclaje o bioconversión.

Los plásticos constituyen el 12 % del total de desechos o sea unos 240 millones de toneladas. Estos se acumulan en vertederos, pero además constituyen la mayor parte de los detritos marinos, ya que más de 8 millones de toneladas de desechos plásticos terminan en el mar cada año. Las corrientes oceánicas y las mareas los acumulan en verdaderas islas de residuos. La mayor acumulación de plástico en los océanos del mundo se produce entre Hawai y California, en donde se ha formado una isla de desechos con una dimensión equivalente a tres veces la superficie de Francia.

La agricultura y las cadenas alimenticias no están exentas de este problema. Con la creciente población urbana, los alimentos fluyen en grandes cantidades de las zonas rurales a las zonas de consumo distantes donde se generan excesos de residuos orgánicos que se contaminan con elementos o sustancias no deseables. Con

esto, la recirculación de nutrientes se hace difícil, promoviendo la utilización de fertilizantes sintéticos. Además, la producción, el procesamiento, el packaging, el transporte, el almacenaje, la distribución y el marketing de sustancias alimenticias generan residuos y desechos de distinta calidad y cantidad que causan contaminación (Viglizzo, 2001).

Los diferentes tipos de residuos y desechos deben ser reutilizados, reciclados, aprovechados como subproductos, o bioconvertidos para disminuir los requerimientos de bienes y servicios y para reducir el impacto ambiental.

3.7. Resumen

Los principales efectos negativos de la agricultura sobre el ambiente son: la erosión y degradación del suelo por deforestación, sobrepastoreo y laboreo excesivo, la contaminación de las aguas, la tierra y el aire con biocidas que afectan a los humanos, animales vertebrados e insectos benéficos, la pérdida de biodiversidad, la emisión de gases de efecto invernadero, la acumulación de nitratos en las napas, el flujo de P y otros nutrientes a las aguas, las pérdidas de tierra agrícola por salinización y sodificación, el agotamiento de las fuentes de agua y, en suma, la pérdida de servicios ecosistémicos (JICA-INTA, 2004; Viglizzo *et al.*, 2011; Foley *et al.*, 2011).

En las regiones más pobres, la mala distribución de los recursos, la marginalidad y la necesidad de alimentos fuerzan a los agricultores a producir en tierras de alta pendiente, poco profundas o semiáridas sin los recursos adecuados, por lo que los suelos son degradados y erosionados. Por el contrario, en áreas donde el nivel tecnológico de la producción es alto, los principales problemas surgen del abundante y mal uso de biocidas y fertilizantes que produce contaminación ambiental y atenta contra la inocuidad de los alimentos y del mal uso del riego que produce degradación de tierras por salinización.

En coincidencia, Pellegrini y Fernández (2018) identifican dos grupos de países cuando analizan el impacto ambiental en las últimas seis décadas; uno conformado principalmente por países más desarrollados que sufren sobre todo los problemas derivados de la intensificación en el uso de insumos, como la contaminación; y otro constituido en mayor medida por países en vías de desarrollo en los cuales predominan los problemas resultantes de la expansión de la superficie cultivada, como la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos y la degradación de los suelos.

Hasta ahora, en términos generales, la oferta de la agricultura ha superado a los incrementos de la demanda, lo que se evidenció en la caída de los precios de los granos durante el siglo XX. Esto ha sido producto de nuestra prodigiosa capacidad creativa e inno-

vadora. Sin embargo, hemos desatendido un aspecto sumamente relevante. Claramente, la agricultura y las actividades humanas en general ocasionan una extralimitación en el uso de los recursos naturales y de la capacidad bioproductiva del planeta. Una extralimitación en el uso de los recursos surge de la convergencia de un rápido crecimiento de la población y de sus actividades económicas, de un límite en la disponibilidad de dichos recursos y de un desfase en la percepción del problema que causa retrasos en la aplicación de las medidas adecuadas (Meadows *et al.*, 2012).

El calentamiento global, la degradación de suelos, la deforestación, la desertificación, la pérdida de biodiversidad, la contaminación y la escasez de agua azul comprometen la futura seguridad alimentaria. Además, la degradación del planeta afecta y afectará a todos los seres humanos independientemente del lugar que habitan y de la responsabilidad que cada uno tenga en generar los daños mencionados. Por esto, frenar y revertir los impactos ambientales de nuestras actividades debe ser de interés de todos los habitantes del mundo.

En Sección 6.2 se muestran, de manera integrada, cifras recientes de variables relacionadas con el impacto ambiental de la agricultura y de las actividades humanas en general. Se detallan, para el mundo y los cinco continentes, datos de superficie cultivada y de bosques, de uso de fertilizantes y plaguicidas, de las extracciones de agua azul, de utilización de energía, y de emisiones de gases de efecto invernadero. Se discute además acerca de las vías para ajustarse a la capacidad bioproductiva del planeta.

Hoy surgen nuevas voces de alarma (Encíclica Laudato SI, 2015; Ripple *et al.*, 2017; IPCC, 2019a; Bologna y Aquino, 2020) por estar la futura producción de alimentos amenazada por la degradación ambiental y el cambio climático. ¿Podrá de ahora en más la agricultura satisfacer la creciente demanda de alimentos y otros productos agrícolas sostenidamente? ¿Podemos desacoplar producción de impacto ambiental?

Para responder estas preguntas y precisar la magnitud de la tarea que debemos encarar, un primer paso necesario es estimar la futura demanda de productos agrícolas, identificando y cuantificando las distintas variables que la componen.

4. LAS FUTURAS DEMANDAS DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS

Las demandas de productos agrícolas continuarán creciendo en las próximas décadas debido al aumento de la población y a los cambios en la calidad de la dieta de muchos habitantes. A conti-

nuación se analizan los efectos de estos y otros factores sobre las futuras demandas.

4.1. Crecimiento poblacional

La población mundial continúa creciendo pero con tasas porcentuales decrecientes (UN, 2019) (Figura 26). Estos cambios resultan de la reducción de la fecundidad (Figura 7) asociada con una mejora del nivel de vida, la educación de la mujer y el acceso a la contracepción. Las recientes estimaciones de las Naciones Unidas (UN, 2019, variante media) indican que la población actual de alrededor de 7.700 millones crecerá a 8.500 millones en algo más de una década, a 9.735 millones para el año 2050 (Figura 27) y a 10.875 millones para fin del siglo, momento en que se espera que la cantidad de personas se estabilice a nivel global (Figura 5). Para el año 2050, las estimaciones fluctúan entre 8.900 millones y 10.600 millones para las variantes baja y alta, respectivamente. Un reciente estudio estima que la población global alcanzará un pico máximo de 9.730 millones en 2064 y, a diferencia de las proyecciones de las Naciones Unidas, conjetura que declinará a 8.790 millones en 2100 (Vollset *et al.*, 2020).

Según el World Population Prospects 2019 de las Naciones Unidas (UN, 2019), la mayor parte del incremento poblacional que se producirá entre hoy y el año 2050 tendrá lugar en un reducido número de países en vías de desarrollo. India, Nigeria, Pakistán, República Democrática del Congo, Etiopía, y Tanzania son los países que más aumentarán su población en términos absolutos en dicho periodo. En contraposición, la población de los países desarrollados apenas se incrementará de 1.250 a 1.280 millones durante este siglo, e incluso se reduciría si no hubiera migraciones desde los países menos desarrollados. En términos geográficos, se proyecta que la población de África subsahariana se duplique al 2050, mientras que la de Europa y Norteamérica aumente solo 2 %.

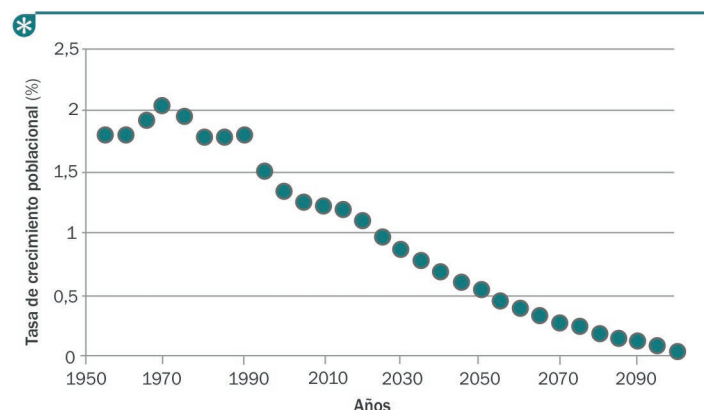


Figura 26: Tasa reales de crecimiento poblacional desde 1950 hasta 2020 y estimadas del 2020 al 2100 según la variante media de las proyecciones de Naciones Unidas (UN, 2019). Los valores para cada año representan las medias del lustro anterior.

La tasa de fecundidad (número de hijos por mujer) continúa decreciendo, aunque con gran variabilidad entre regiones. La mitad de la población vive actualmente en países donde la tasa de fecundidad es inferior a 2,1. Por el contrario, en África subsahariana dicha tasa es de 4,6 hijos por mujer, valor que se reduce lentamente. La tasa de fecundidad global ha caído de 3,2 hijos por mujer en 1990 a 2,5 en 2019, y se espera que continúe reduciéndose hasta alcanzar el valor de 2,2 en 2050 y el de reemplazo a fines de este siglo (UN, 2019).

Contrariamente a lo observado para la tasa de fecundidad, la longevidad de las personas está aumentando (Figura 7; UN, 2019), incluso en muchos países de Asia y África. La expectativa de vida al nacimiento crecerá a nivel global de 72,6 años en 2019 a 77,1 años en 2050 y a 83 años en 2100. Los progresos en este aspecto son notables, no obstante, las brechas entre países se mantienen.

Actualmente, la edad mediana mundial, o sea aquella en la cual la mitad de los habitantes son mayores y la otra mitad más jóvenes, es 29,6 años. Alrededor de un cuarto de la población tiene menos de 15 años, el 62 % tiene entre 15 y 59 años, y el resto más de 59 (UN, 2019). Como consecuencia de la mayor expectativa de vida, el grupo de personas con más de 65 años de edad se incrementará marcadamente durante el transcurso de este siglo. Su contribución a la población mundial total crecerá del 9 al 16 % entre 2019 y 2050. Puntualmente, en Europa y Norteamérica, la contribución de este grupo etario alcanzaría el 25 % a mitad de siglo. En el año 2018, por primera vez en la historia, las personas mayores a 65 años superaron en número a los niños menores a cinco años. Finalmente, la población mayor a 80 años se triplicará entre 2019 y 2050, alcanzando los 426 millones.

Esta situación genera un desafío adicional al de la alimentación ya que afecta al mercado laboral y a la economía e incrementa las presiones fiscales para sostener los sistemas de salud, pensiones y protección social de personas mayores. Este problema se agrava en los países desarrollados donde el número de personas en edad laboral se reducirá. Contrariamente, el sector en edad laboral crecerá en los países menos desarrollados, lo que refuerza la necesidad de creación de empleos como parte de la estrategia de desarrollo.

La tasa de crecimiento global, que hoy es cercana al 1,1 % anual, continúa bajando y llegaría a valores cercanos a cero a fines de siglo (Figura 26). Sin embargo, sigue siendo alta en los 49 países menos desarrollados del mundo (2,4 % anual), para los que se espera una reducción en las próximas décadas asociada con caídas en la tasa de fecundidad. La población se ha reducido al menos 1 % en 27 países entre 2010 y 2019 debido a baja fertilidad y en algunos casos a emigraciones. Se espera que este fenómeno ocurra en más

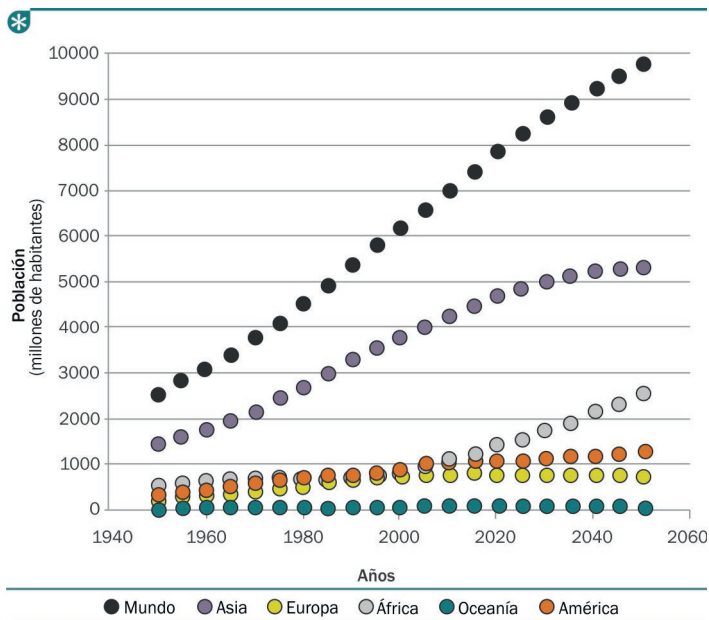


Figura 27: Evolución de la población humana desde 1950 hasta 2050 en el mundo y discriminada para África, Europa, Asia, América y Oceanía (UN 2019; variante media).

de 55 países entre hoy y el 2050. En China, por ejemplo, se proyectan reducciones del 2,2 % en dicho periodo.

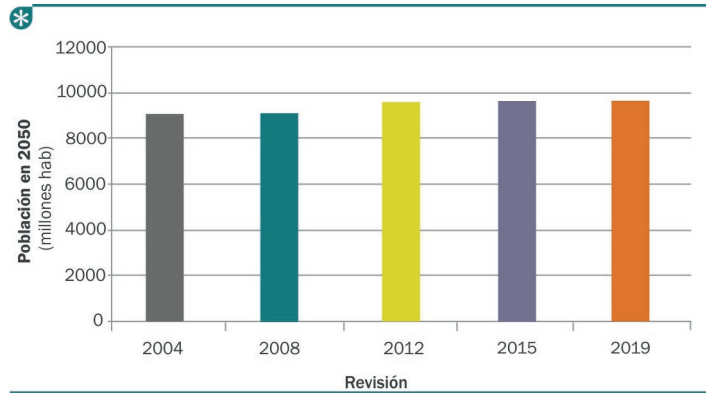
Las migraciones son actualmente un componente importante de los cambios poblacionales. Estas se deben a demandas laborales, dictaduras, conflictos, guerras y degradación ambiental. La degradación ambiental por desertificación (Sahel), los avances del nivel del mar (Bangladesh) o las muertes de los corales (Pacífico sur) comprometen la seguridad alimentaria en muchos países y generarán grandes migraciones a lo largo del siglo XXI.

Las proyecciones de población recientes (UN, 2012; 2015; 2019) predicen para el 2050 valores algo superiores a los estimados previamente por la misma institución (Figura 28). Esto se debe a que i) las estimaciones de disminuciones futuras de tasa de fecundidad son menores en las recientes proyecciones (especialmente en varios países de África subsahariana); ii) pequeños incrementos en trayectorias proyectadas de fecundidad de países muy poblados de Asia producen diferencias importantes a largo plazo; y iii) la expectativa de vida aumentó en muchos países. No obstante, las últimas estimaciones realizadas entre 2012 y 2019 son bastante coincidentes (Figura 28).

En conclusión, si bien la tasa de crecimiento poblacional se está reduciendo marcadamente, se espera un incremento poblacional de alrededor del 26 % entre los años 2019 y 2050, con notables diferencias entre continentes y regiones. Esto constituye el principal factor del aumento de la demanda o necesidad de alimentos.



Figura 28: Estimaciones de la futura población mundial en el año 2050 realizadas por Naciones Unidas entre los años 2004 y 2019. Datos correspondientes a las variantes medias de las proyecciones UN, 2004, 2008, 2012, 2015a, 2019.



4.2. Calidad de la dieta

La humanidad se alimenta de unas 250 especies vegetales aunque el número total de especies comestibles es cercano a 50.000. Obtenemos el 90 % de la energía que demandamos de solo 15 especies y 2/3 de ella de apenas 4 (maíz, trigo, arroz y soja; Caparrós, 2014). La concentración de la producción mundial en estas 4 especies se basa en la facilidad de secado, transporte y almacenamiento de los granos cosechados, y para los cereales, además, en su bajo requerimiento de energía para procesamiento y cocción cuando se utilizan para alimento humano directo (Cassman y Grassini, 2020).

Los países con altos ingresos consumen dietas más calóricas y más ricas en productos de origen animal. Los países desarrollados utilizan el 73 % de los cereales producidos para alimentar animales mientras que los países en vías de desarrollo solo el 37 %. Por esto, la disponibilidad de alimentos de origen animal, expresada en energía disponible por habitante y por día, varía marcadamente entre regiones del mundo (Figura 29).

Una dieta diaria rica en productos animales que incluye 11,5 Megajoules (Mj) de energía y 92 gramos de proteína requiere algo más del triple de equivalentes grano (EG) que una dieta vegetariana que aporta 10 Mj de energía y 75 gramos de proteína (4,21 vs. 1,34 kg de EG por hab. por día; Bakker, 1985). Estos valores de EG son expresados en materia seca y representan la cantidad de grano necesaria para producir los alimentos que se consumen diariamente que derivan o pueden derivar de dichos granos (ej. pan, pasta, harina, carne, leche, huevos, etc.) más el grano que se podría producir en la superficie destinada al cultivo de los otros alimentos de la dieta diaria no relacionados con la producción de granos, como frutas y hortalizas. Debido a que en cada paso de la cadena trófica (vegetal, herbívoro, carnívoro) se disipa una importante proporción de la energía química del alimento, la com-

posición de la dieta tiene fuertes implicancias en las calorías requeridas de manera directa e indirecta y en las emisiones de gases de efecto invernadero *per cápita* (Searchinger *et al.*, 2018; Lancet Commissions, 2019).

El poder adquisitivo aproximado mediante el producto bruto *per cápita* ha crecido en prácticamente todos los países del mundo durante las últimas décadas (Figura 30). Los países europeos, Estados Unidos, Canadá, y otros países desarrollados muestran los valores más altos y los mayores incrementos en valores absolutos en los últimos 60 años. Países del S y SE asiático incrementaron notablemente en términos relativos sus productos brutos *per cápita* en el mismo periodo. La mayor parte de los países de África subsahariana está muy retrasada en cuanto a la evolución de esta y otras variables de desarrollo.

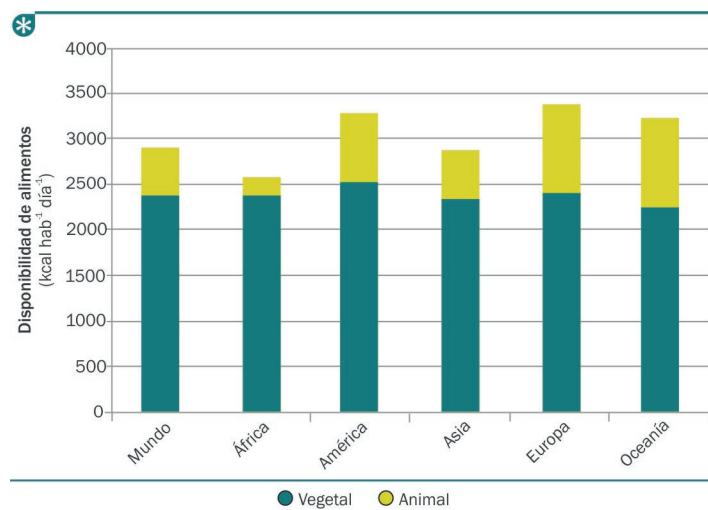


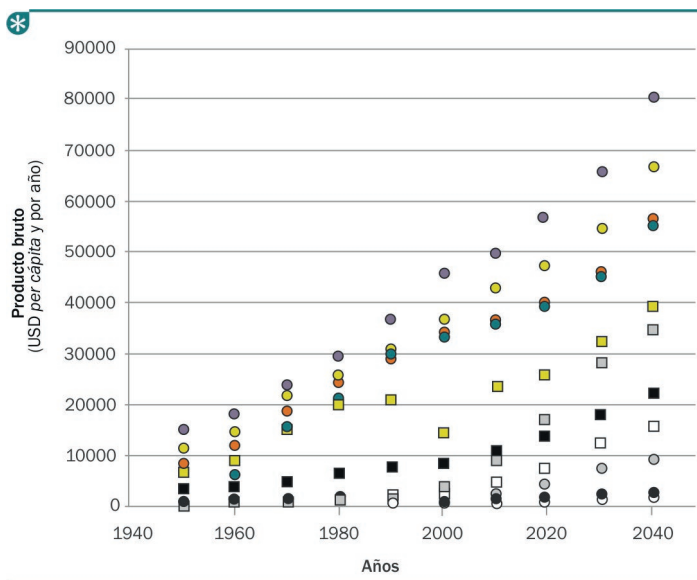
Figura 29: Disponibilidad actual de alimentos de origen vegetal (sector verde de la barra) y animal (sector amarillo de la barra) para consumo humano directo en el mundo y en distintas regiones. Valores expresados en kcal por habitante por día (FAO, 2014), calculados como producción anual, más importaciones, menos exportaciones, más reducción de reservas (stocks). Los productos vegetales utilizados para alimentación animal no se incluyen en las kcal vegetales disponibles para consumo humano directo, sino que se transforman y luego computan como kcal de origen animal. No son kilocalorías efectivamente consumidas ya que no se descuentan pérdidas y desperdicios.

El poder adquisitivo *per cápita* creció 22 % a nivel global entre 2007 y 2017 (FAO, 2020), correspondiendo 11 % para África, 54 % para Asia, y 7 % para América y Europa. Se estiman incrementos anuales del 1,3 % en el producto bruto *per cápita* global entre 2005 y 2050, o sea un incremento cercano al 80 % en 45 años (Vos y Bellu, 2019). Este valor es inferior al estimado o informado previamente (2,5 % por año) (Tilman *et al.*, 2011; Andrade, 2016a).

El aumento del poder adquisitivo *per cápita* entre 2019 y 2040 sería de alrededor de 40 % para las naciones más desarrolladas y superaría el 100 % en naciones menos desarrolladas (Gapminder, 2020). No obstante, las estimaciones indican que naciones muy pobres no alcanzarán niveles adecuados de ingresos por persona en el periodo considerado (Figura 30) (World Bank, 2009; LCAM, 2009; Tilman *et al.*, 2011; Vos y Bellu 2019; Gapminder, 2020). O



Figura 30: Evolución del poder adquisitivo aproximado como producto bruto *per cápita* y por año desde 1950 a 2020 y proyección al año 2040. Los valores inferiores corresponden a los países más pobres representadas por Níger (círculos blancos), Tanzania (círculos negros) y Bangladesh (círculos grises). Los valores altos corresponden a los países ricos como Japón (círculos verdes), Francia (círculos naranjas), Suecia (círculos amarillos) y EUA (círculos violetas). Los valores intermedios corresponden a India (cuadrados blancos), Colombia (cuadrados negros), China (cuadrados grises) y Rusia (cuadrados amarillos). El producto bruto *per cápita* y por año se convirtió a dólares utilizando la paridad de poder adquisitivo (ppa) y está expresado en dólares ajustados por inflación; año de referencia=2011 (Gapminder, 2020).



En la medida que crece el poder adquisitivo aumenta la cantidad de calorías y de carne consumida. Las funciones que relacionan el consumo de carne y calorías con el poder adquisitivo son similares, salvo excepciones, para las distintas regiones del mundo (Figura 31) (Tilman *et al.*, 2011). En relación con el resto del mundo, China presenta menores incrementos en consumo de calorías “vacías” (calorías no acompañadas por vitaminas y proteínas) e India inferiores aumentos en consumo de carne en respuesta a un mayor poder adquisitivo (Tilman y Clark, 2014).

En línea con lo expresado, la proporción de productos animales en la ingesta de energía creció de 8 a 13 % para productos animales en los países de bajos y medios ingresos en los últimos 50 años (Vos y Bellu, 2019). La proporción de frutas y vegetales subió de 4 a 7 % y, en sentido inverso, la proporción de cereales bajó del 57 al 50 %. Estos cambios se dieron en mayor medida en China y en el SE asiático.

De la información presentada surge la estrecha relación global entre la demanda de calorías de cultivos para alimentación animal y humana y el producto bruto *per cápita* (Figura 32; Tilman, 2011). Relaciones similares se encuentran entre demanda de pro-

teínas vegetales e ingreso *per cápita*. Dichas relaciones, comunes para los diferentes grupos económicos, resaltan las diferencias de demanda entre las naciones pobres y ricas. Las altas demandas de las naciones ricas se deben al alto consumo promedio de energía y especialmente de carne por habitante, este último caracterizado por las bajas eficiencias de conversión de calorías y proteínas de cultivos en productos animales.

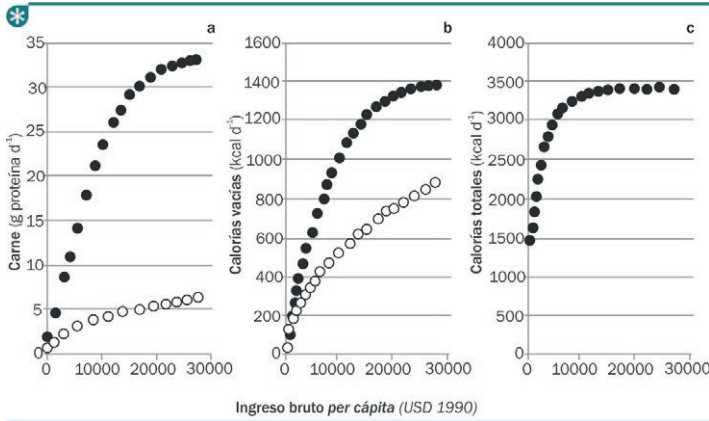


Figura 31: Tendencias de consumo de carne (a), calorías vacías (b) y calorías totales (c) en función del poder adquisitivo expresado como producto bruto por habitante y por año en USD del año 1990. Las curvas negras representan la relación común para todos los países. Las excepciones son indicadas por círculos blancos y corresponden a India en (a) y a China en (b).. Adaptado de Tilman y Clark (2014).

Según estimaciones basadas en el aumento de la población, del poder adquisitivo, y en la relación entre este y la dieta, se esperan incrementos globales en la demanda de calorías de cultivos entre 2018 y 2050 (Sección 4.4). Estos incrementos responden entonces a una mayor población y a mayores consumos de carne y energía total por individuo.

En línea con estas predicciones, la producción global de carne (de cerdo, de pollo y bovina) se incrementó 17 % entre 2010 y 2018, lo que significó un aumento de 7 % en la producción por habitante. En el año 2018, las producciones de carne de cerdo, de pollo y vacuna alcanzaron 121, 114, y 67 millones de t, respectivamente (FAO, 2020). Se estima que la producción de carne aumentará entre 50 y 73 % hacia el 2050 (Bonny *et al.*, 2017),

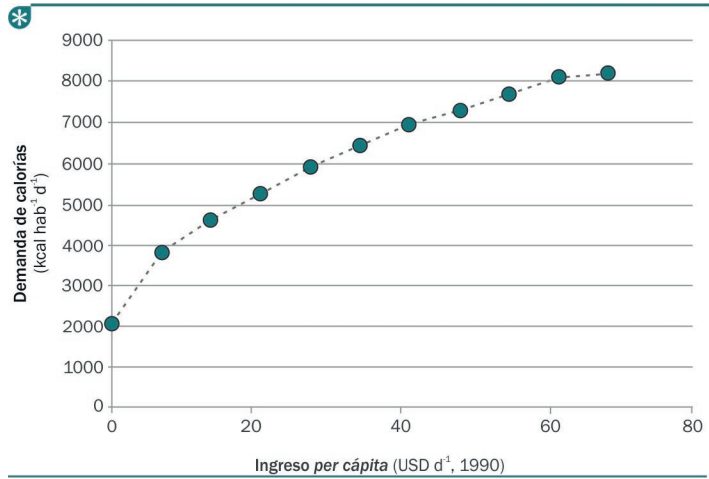
Se concluye entonces que la calidad de la dieta alimenticia mejorará a nivel global en las próximas décadas, principalmente en países del este y sur de Asia. Las estimaciones basadas en proyecciones del poder adquisitivo indican que los países más pobres no resolverían sus problemas de seguridad alimentaria hacia el 2050 (Figura 30). En este sentido, toma relevancia solucionar los problemas que las poblaciones más vulnerables de estas naciones padecen para asegurar una dieta moderada y adecuada a todos los habitantes del mundo.



Figura 32: Demanda diaria de kilocalorías de cultivos por habitante en función del poder adquisitivo promedio expresado como producto bruto *per cápita* y por año (USD del año 1990).

Adaptado de Tilman *et al.* (2011). Los datos corresponden a 100 naciones que representan el 91 % de la población mundial.

Incluye calorías de cultivos demandadas para consumo humano y para producción animal (food y feed), sin restar pérdidas ni desperdicios. Una curva similar presenta la relación entre demanda diaria de proteínas de cultivos por habitante y el poder adquisitivo, con valores de entre 50 y 300 g de proteína vegetal $\text{hab}^{-1} \text{d}^{-1}$ (Tilman *et al.*, 2011).



4.3. Biocombustibles y biomateriales

El consumo de energía total a nivel global creció 8 % entre 2010 y 2017 y 59 % entre 1990 y 2017, alcanzando este último año un valor de 586 Exajoules ($E_j = 10^{18} \text{ j}$); (IEA, 2019, REN 21, 2019). La demanda mundial de energía crecería cerca de 30 % desde 2020 a 2040 y 3,5 veces durante el siglo XXI (IEA, 2019). Las crecientes demandas energéticas, las preocupaciones sobre las emisiones de dióxido de carbono que contribuyen al calentamiento global, y las limitadas disponibilidades de las fuentes tradicionales determinan la necesidad y la obligación de ampliar los aportes de las energías alternativas renovables y limpias (Dresselhaus y Thomas, 2001; WRI, 2007; IEA, 2012b; REN 21, 2019).

Los biocombustibles o la bioenergía, que provienen de productos y residuos de los seres vivos, constituyen una fuente renovable importante. Entre ellos están la leña, el biogás, y los biocombustibles líquidos.

La leña aporta el 7,5 % del consumo global de energía actual, pero su utilización, de no mediar reposición, se asocia con procesos de deforestación. El biogás es un combustible producido por la degradación de materia orgánica por parte de microorganismos en un ambiente libre de oxígeno. La producción global de este combustible en 2017 fue de alrededor de 25 Mt_{oe} o 1,04 E_j por año.

Los biocombustibles líquidos son producidos mediante el procesamiento de varios tipos de biomasa y son utilizados para vehículos de combustión interna o para aplicaciones industriales.

Se categorizan en biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación según la fuente de materia prima y el proceso tecnológico de conversión.

Los biocombustibles de primera generación incluyen i) el etanol que se forma a partir de la fermentación de los azúcares de la caña de azúcar y de la remolacha azucarera y del almidón de maíz y ii) el biodiésel, fabricado a través de la trans-esterificación de los aceites de colza, soja, girasol o palma. Los biocombustibles líquidos sustituyen parcialmente a los combustibles derivados del petróleo. En el año 2018 el volumen de producción fue de cerca de 200 millones de m³, lo que representó menos del 1 % de la energía global consumida (REN21, 2019). La mayor parte correspondió a bioetanol basado en grano de maíz y en caña de azúcar (74 %), seguido por el biodiésel principalmente de grano de colza y soja y de aceite de palma (23 %). La producción mundial de bioetanol es liderada por EUA (57 %), seguido por Brasil (29 %) y la UE (4 %). Los precursores para su producción son principalmente maíz en los EUA, maíz y trigo en la UE, y caña de azúcar en Brasil. A su vez, la producción de biodiésel es liderada por la UE (38 %), seguida por EUA (16 %) y Brasil (14 %), siendo los principales precursores la colza en Europa y la soja en los EUA y Brasil.

El uso de dichos biocombustibles líquidos tiene las ventajas de aportar a la seguridad energética, reducir las emisiones de dióxido de carbono, generar oportunidades de desarrollo rural (empleo e inversiones) y dar tiempo para la transición energética del petróleo a otras energías renovables. No obstante, presenta amenazas relacionadas con el aumento de los precios de los granos y con el uso y degradación de los recursos naturales (Correa *et al.*, 2019). Además, los requerimientos de tierra y la ineficiencia de los procesos involucrados constituyen limitantes para su uso a gran escala (Rubin, 2008; Naik *et al.*, 2010).

En el ciclo 2018 se utilizaron globalmente 140 millones de toneladas de maíz para la obtención de etanol. El uso de este cereal para este fin está estancado desde hace unos años (Energy 101, 2020). Paralelamente, en 2014 se informó que se convirtieron alrededor de 30 millones de toneladas de aceite vegetal en biodiésel (Fischer *et al.*, 2014).

Con las regulaciones adecuadas, los biocombustibles basados en grano serían gradualmente desplazados por biocombustibles de segunda generación (Figura 33) que no compiten con la producción de alimentos y que presentan menor riesgo de promover deforestaciones y menores emisiones de gases de efecto invernadero. Los biocombustibles de segunda generación son productos vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con alto contenido energético a base de celulosa (pastos, árboles, residuos de

agricultura y producción forestal) o aceite (semillas de *jatropha*, *crotón*, etc.) (Tilman *et al.*, 2009; Leong *et al.*, 2018). También incluyen los aceites residuales de la cocción y residuos animales, entre otros productos.

Es deseable que la producción primaria para estos fines se realice sobre suelos degradados o no aptos para cultivos alimentarios, empleando buenas prácticas agrícolas que no impliquen riesgo ambiental ni pérdida de biodiversidad (UNEP, 2014). La producción de etanol basada en celulosa ha aumentado en los últimos años, aunque no al ritmo inicialmente proyectado debido a dificultades técnicas y a altos costos de producción (Padella *et al.*, 2019).

Las algas constituyen una alternativa prometedora como combustibles de 3.^a generación ya que pueden contribuir a solucionar los problemas indicados para aquellos de 1.^a y 2.^a generación. Las microalgas poseen una alta capacidad fotosintética y un alto potencial para la producción de biodiésel, sustancias químicas especiales y productos nutricionales (Alalwan *et al.*, 2019).

Hay también buenas expectativas acerca de biocombustibles más avanzados (de 4.^a generación) basados en cultivos bioenergéticos y microorganismos genéticamente modificados. Para estos fines se buscan organismos con altas habilidades para convertir CO_2 u otros sustratos en combustible, con elevados contenidos de aceite y con baja complejidad estructural (Alalwan *et al.*, 2019). También se están desarrollando tecnologías de proceso novedosas que incluyen pirólisis, gasificación e incluso la transformación de energía solar en combustible. El objetivo general de estas tecnologías incipientes es mejorar el rendimiento y crear un destino artificial de carbono para eliminar o minimizar las emisiones. Los rendimientos y las eficiencias de los biocombustibles avanzados son muy superiores a los de primera generación. No obstante, los procesos para su elaboración requieren aún de importantes inversiones en investigación y desarrollo.

Se estima que la demanda mundial de biocombustibles líquidos crecerá a un ritmo de 2,6 % anual desde 2018 al 2050, lo que significa que su producción puede multiplicarse 2,27 veces en ese periodo (Vos y Bellu, 2019). La International Energy Agency (IEA, 2012a) proyecta que los biocombustibles aportarán el 27 % del total de los requerimientos de combustibles del transporte en el año 2050, lo que reduciría el consumo de energía fósil y las emisiones de gases de efecto invernadero en 2,1 Gt de CO_2 por año. Nuevamente, dicha energía tiene que ser producida sustentablemente, o sea sin degradar recursos y sin competir con la agricultura.

Futuras proyecciones de producción agrícola consideran que el volumen de granos para producir etanol y biodiésel no aumentará y que los futuros incrementos de producción de biocombusti-

bles se basarán en aquellos de 2.^a, 3.^a y 4.^a generación (Figura 33). Alcanzar esta meta incrementaría la disponibilidad de alimentos para la población.

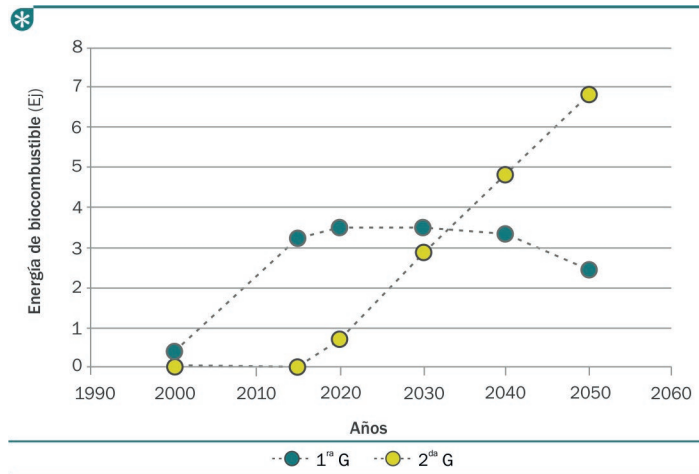


Figura 33: Evolución de la producción de biocombustibles de primera y segunda generación del 2000 al 2050. Fuente: IEA (2019); Vos y Bellu (2019).

Los productos vegetales son también demandados para la síntesis de biopolímeros. Estos materiales adquieren creciente relevancia para reemplazar a los polímeros y plásticos derivados del petróleo y por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El volumen total mundial producido de biopolímeros ronda los 3,8 millones de t, lo que representa 1 % de la producción basada en polímeros derivados del petróleo (Nova Institute, 2020). Más de la mitad de los biopolímeros producidos son biodegradables, por lo que aportan a la solución del grave problema de eliminación de los desechos. Solo el 20 % de los plásticos se recicla y una parte importante del sobrante termina en los océanos (Jambeck *et al.*, 2015; Sección 3.6). Los plásticos biodegradables se descomponen a un ritmo mayor y originan menores cantidades de gases de efecto invernadero en comparación con los tradicionales. El principal plástico biodegradable es el ácido poliláctico, que tiene buenas propiedades en cuanto a biodegradabilidad, compostabilidad, fuerza mecánica, transparencia y seguridad (Datta *et al.*, 1995). Es producido por fermentación bacteriana de almidón de grano o de otros productos vegetales con un rendimiento de 0,96 g de ácido láctico por g de almidón.

Si bien la producción de plásticos biodegradables es actualmente muy baja, se proyecta un crecimiento durante los próximos años (UNEP, 2014), para lo cual se deben contemplar los aspectos ambientales y de competencia con los alimentos que se indicaron para los biocombustibles.

4.4. Estimaciones sobre las futuras demandas de productos agrícolas

En la edición anterior se realizaron estimaciones de los incrementos en la demanda de productos agrícolas alimenticios (Andrade, 2016a). En los próximos párrafos se resumen y se recalculan dichas estimaciones.

Se esperaba que la demanda de productos agrícolas alimenticios aumentara alrededor de 70 % entre 2010 y 2050 según un cálculo realizado sobre la base de i) garantizar a todos los habitantes en el 2050 una dieta moderada y adecuada, ii) mantener el nivel de consumo en aquellos países con dietas más ricas, y iii) limitar el uso de alimentos para biocombustibles. Dicho incremento se componía de aumentos del 38 % en la población y de alrededor de 23 % en la calidad de la dieta.

Otras estimaciones arrojaban resultados parecidos. Bruinsma (2009) concluyó que la producción agrícola debía expandirse 70 % entre 2006 y 2050 para cubrir las necesidades de la población ampliando el promedio de energía disponible para consumo por día y por persona a 3130 kcal. Tres años después, Alexandratos y Bruinsma (2012) proyectaron un 60 % de expansión de demanda desde 2006 a 2050. Coincidentemente, Jaggard *et al.* (2010) concluían que el consumo total de alimentos debería ampliarse 60 % para sostener la población en el año 2050 y Tittone (2013) afirmaba que el total de calorías requeridas crecería 70 % considerando cambios en la dieta y en la población.

Análisis realizados por Tilman *et al.* (2011) sobre el crecimiento poblacional, el aumento del poder adquisitivo, y la respuesta del consumo a dicho aumento para las naciones de los diferentes grupos económicos del mundo pronosticaban incrementos del 100 % en la demanda global de calorías de cultivos y de 110 % en la de proteínas de cultivo entre los años 2005 y 2050. Cálculos recientes presentados por Vos y Belu (2019) indican una ampliación en la demanda de productos agrícolas del 50 % entre 2013 y 2050.

Las proyecciones varían por diferencias en las estimaciones de incremento de poder adquisitivo, de crecimiento poblacional, de la dieta futura, del uso de biocombustibles líquidos en base a alimentos, por diferencias entre demandas y necesidades, y porque parten de distintas líneas de base. Las necesidades de aumento de producción también diferían en función del cultivo considerado. Para los cereales en particular, y considerando población, dieta y biocombustibles, Tester y Langridge (2010) proyectaron valores de demanda mundial de hasta 4.000 millones de toneladas para el año 2050, lo que representaba incrementos de 100 % sobre la producción del año 2000 y de 60 % sobre la producción del año 2010. Los mayores aumentos de demanda corresponden al maíz

y los menores al arroz. Coincidentemente, Alexandratos y Bruisma (2012) sostenían que el maíz presentaría un incremento de demanda de 60 % hacia el 2050, valor superior a los del arroz y del trigo. Además, los mismos autores calculaban expansiones de la demanda del 80 % para el cultivo de soja, del 89 % para aceites vegetales y del 75 % para el azúcar entre los años 2006 y 2050. Finalmente, la demanda de fibras también se incrementaría en los próximos años, pero con una participación proporcional decreciente de las fibras naturales. La demanda de algodón, que representaba el 29 % de la demanda total de fibra crecería 27 % entre 2006 y 2050 (Bruisma, 2009), mientras que la de fibras sintéticas se duplicaría entre 2010 y 2030 (Textile World, 2015).

Transcurrida ya una década desde los años base de aquellas estimaciones, es posible realizar un ajuste de estas y un análisis acerca de su precisión, para lo cual se consideran los datos proyectados por Alexandratos y Bruisma (2012), Tilman *et al.* (2011) y Andrade (2016a) para la demanda de alimentos y por Tester y Langridge (2010) para la de cereales (Tabla 3).



	Aumento (%)	Año Base	Aumento anual (%)	Estimación 2018 (t x10 ⁶)	Estimación 2050 (t x10 ⁶)	Aumento 2018-2050 (%)
A	60	2006	1,36	5.660	7.782	38
B	100	2005	2,22	6.210	9.636	55
C	70	2010	1,75	6.092	9.085	49
D	60	2010	1,50	2.763	3.947	43

Recalculando en función de los años transcurridos, manteniendo constante el objetivo de producción al año 2050, y suponiendo incrementos lineales, los incrementos de demanda entre 2018 y 2050 serían 38, 55 y 49 % para las estimaciones de Alexandratos y Bruisma (2012), Tilman *et al.* (2011), y Andrade (2016a), respectivamente (Tabla 3; Figura 34).

Utilizando la misma metodología para los cereales, o sea recalculando en función de los años transcurridos, manteniendo constante el objetivo de producción al año 2050, y suponiendo incrementos lineales, el aumento de demanda de cereales entre 2018 y 2050 sería del 43 %.

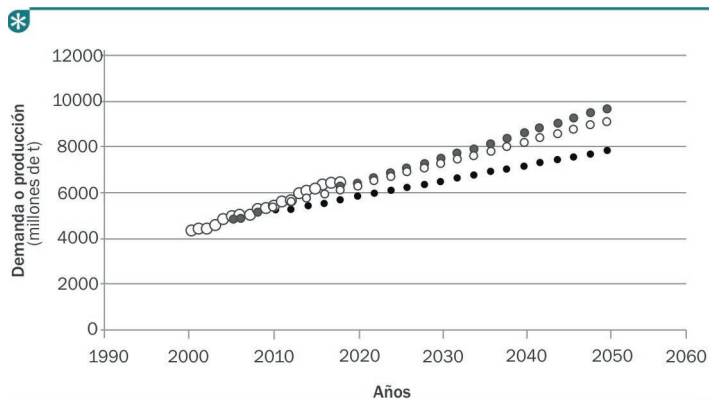
Las estimaciones indican que para el año 2018 se deberían haber producido 5.660, 6.210, y 6.092 millones de t de alimentos según Alexandratos y Bruisma (2012), (B) Tilman *et al.* (2011), (C) Andrade (2016a), respectivamente. El valor real de producción del año 2018 fue superior, ya que alcanzó 6.382 millones t de alimentos (Figura 34).



Tabla 3: Proyecciones actualizadas de las estimaciones realizadas para incrementos de demanda al año 2050 de alimentos vegetales por (A) Alexandratos y Bruisma (2012) (FAO), (B) Tilman *et al.* (2011), (C) Andrade (2016a), y solamente para cereales por (D) Tester y Langridge (2010). Se presentan los aumentos porcentuales originales, los años base, el aumento por año expresado como porcentaje del año base, las estimaciones obtenidas para los años 2018 y 2050 y el aumento porcentual esperado entre 2018 y 2050. Los datos de producción se expresan en millones de toneladas. Elaborado según FAO (2020) y UN (2019). Incluye alimento humano y animal. Los aumentos por año se calcularon como porcentaje del año base suponiendo incrementos lineales para el periodo completo. La estimación de producción del año 2018 se calculó para cada caso en base a los respectivos incrementos lineales y suponiendo similitud entre demanda y producción. Los alimentos considerados para el cálculo incluyen cereales, soja, girasol, palma, maní, nueces, raíces, tubérculos, hortalizas, frutas y legumbres.



Figura 34: Proyecciones lineales de las estimaciones realizadas para incrementos de demanda al año 2050 de alimentos vegetales por (A) Alexandratos y Bruisma (2012) (puntos negros), (B) Tilman *et al.* (2011) (círculos grises) y (C) Andrade (2016a) (círculos blancos). La demanda de alimentos incluye cereales, soja, girasol, palma, maní, nueces, raíces, tubérculos, hortalizas, frutas y legumbres. Se consideraron incrementos lineales entre los años base y 2050. La figura incluye los datos reales de producción de estos alimentos entre los años 2000 y 2018 (círculos blancos grandes; FAO, 2020). Para mayores detalles ver Tabla 3. Metodología adaptada de Hunter *et al.* (2017).



Este análisis indica que las proyecciones lineales realizadas a partir de las estimaciones de distintos autores subestiman, algunas levemente, los incrementos reales de demanda observados hasta el año 2018 (Figura 34) y, probablemente, los futuros hasta el 2050. No obstante, los valores estimados y reales pueden acercarse en el futuro considerando que i) la tasa de crecimiento poblacional anual se desaceleraría, principalmente a partir de 2035 (Figuras 26 y 27) y ii) la mejora en la dieta podría producirse a tasa decreciente en la medida que en algunos países se aproximen a los niveles nutricionales esperados, entre otras razones. Esto implica que, de ser correctas las futuras estimaciones, la curva de producción de alimentos a futuro debería mostrar crecimientos con tasas decrecientes. Coincidentemente con este análisis, Hunter *et al.* (2017) indicaron que las estimaciones para el año 2014 según las predicciones 2005-2050 de la FAO eran inferiores a los datos reales de dicho año.

Utilizando los datos de aumento de poder adquisitivo de Gapminder (2020) y FAO (2020), los datos poblacionales actuales y futuros de UN (2019) y la relación funcional entre calorías de cultivos demandadas (food y feed) en función del poder adquisitivo (Figura 32), se realizaron nuevas estimaciones del incremento de demanda de alimentos de cultivos entre 2018 y 2050 para el mundo y los 5 continentes (Tabla 4; Figura 35). Las nuevas esti-

Para el caso de los cereales, las estimaciones de Tester y Landrige indican que para el año 2018 se deberían haber producido 2.763 millones de t. Nuevamente, el valor real de producción del año 2018 fue algo superior, alcanzando 2.964 millones t cereales (FAO, 2020). Las importantes mejoras en el volumen total de producción de cultivos que tuvieron lugar en los últimos 10 a 15 años (Figuras 8 y 12) reafirman estas observaciones.

maciones según esta metodología indican que la demanda global de alimentos de cultivos crecería 47 % entre 2018 y 2050. Estos valores son similares a los calculados actualizando estimaciones previas en función de proyecciones lineales (Tabla 3).



	Población	Demanda por hab	Demanda total
	Veces los valores de 2018		
África	1,95	1,15	2,25
América	1,18	1,12	1,33
Asia	1,16	1,31	1,52
Europa	0,95	1,06	1,01
Oceanía	1,38	1,03	1,42
Mundo	1,28	1,15	1,47

Los mayores incrementos corresponden a África que multiplicará su demanda 2,25 veces debido principalmente a su crecimiento poblacional (Tabla 4). La sigue Asia con un incremento de demanda de productos de cultivos de alrededor de 52 % al año 2050 que se explica en mayor medida por una mejora de la dieta (Tabla 4). Si además se aspira a sustituir importaciones, los incrementos de producción deben ser aún mayores ya que ambos continentes son actualmente netos importadores de alimentos (FAO, 2020). América incrementará su demanda alrededor de 33 % y Europa la mantendrá, con disminución de su población. Los valores de producción futura de estos continentes se deben ajustar en función de los objetivos de saldos de exportación.

Los niveles de aumento de producción requeridos globalmente, aunque sean menores en términos absolutos y relativos que los producidos entre 1960 y 2010, y aunque sean inferiores a los estimados sobre la base del año 2010, siguen constituyendo un gran desafío dado los altos volúmenes actuales de producción, el deterioro de los recursos y las amenazas del calentamiento global. Más aún, el 59 % de las cerca de 2.000 millones de personas que se sumarán a la población mundial entre 2020 y 2050 nacerá en África. Este continente incrementará así su población un 86 %, lo que sumado a las necesidades de una dieta más adecuada que la proyectada en función del aumento del poder adquisitivo y a los acuciantes problemas ambientales, conforma un escenario muy complejo.

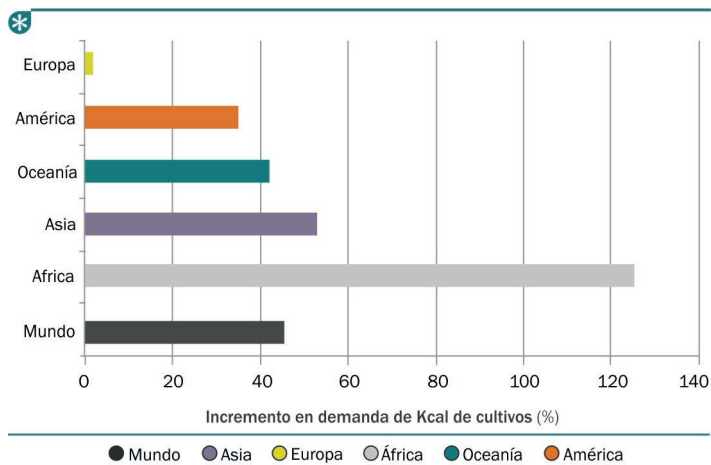
La producción de cultivos de África subió solo 23,6 % entre 2010 y 2018 (FAO, 2020), valor similar al crecimiento poblacional (23 %;



Tabla 4: Estimaciones de la población, de la demanda *per cápita* y total de calorías de cultivos para consumo humano y para producción animal (food y feed) en 2050, expresadas en relación con los valores correspondientes al año 2018. Las estimaciones de la demanda de calorías de cultivos se determinaron de acuerdo al PBI real *per cápita* utilizando la relación entre estas variables presentada por Tilman *et al.* (2011) para lo cual fue necesario ajustar los datos de PBI por inflación. El PBI real de 2018 y 2050 se estimó para cada continente en función de datos y proyecciones de Gapminder (2020) y FAO (2020). Los datos poblacionales se obtuvieron de UN (2019). Los cálculos se realizaron con datos promedios de ingreso y demanda por habitante por lo que no contempla la distribución del PBI/*cápita* dentro de cada región.

UN, 2019). Esto indica que la producción *per cápita* no mejoró en el continente africano, y que incluso se deterioró de 2015 a 2018. La situación es más crítica si se analiza la región subsahariana separadamente.

Figura 35: Incremento porcentual de los requerimientos de calorías de cultivos para alimentación humana y producción animal (food y feed) entre 2018 y 2050 para las distintas regiones del mundo. Gráfico construido a partir de la información derivada de Gapminder (2020), FAO (2020), UN (2019) y Tilman *et al.* (2011).



En un análisis numérico sencillo, considerando conjuntamente la superficie con aptitud agrícola y las posibilidades de intensificación que incluye mejoras en los rendimientos potenciales, cerrar brechas de rendimiento e intensificar la secuencia de cultivos, el potencial de la Tierra para producir alimentos, fibra y energía supera a la futura demanda a nivel global (Andrade, 1998; Nature, 2010; Godfray *et al.*, 2010). Sin embargo, Springmann *et al.* (2018) calcularon que como resultado de los cambios esperados en la población y en los niveles de ingresos, los efectos ambientales de la producción de alimentos podrían aumentar entre un 50 % y un 90 % entre 2010 y 2050 en ausencia de cambios tecnológicos y de medidas de moderación y mitigación. Por lo tanto, continuar con las tendencias actuales de producción, de degradación del ambiente y de hábitos de consumo comprometerá seriamente la futura disponibilidad de alimentos, lo que conduciría a graves crisis en muchos lugares del mundo (Molden, 2007; Ripple, 2017; Lancet Commissions, 2019).

En el Capítulo 2 hemos puesto la mirada en el pasado, remarcando los principales eventos de innovación desde la invención de las primeras herramientas de piedra hace más de 2 millones de años hasta la revolución verde de la segunda mitad del siglo XX. A lo largo de este prolongado periodo superamos adversidades y nos adaptamos a ambientes contrastantes. Pudimos mantener e incluso superar la oferta de alimentos por habitante, aun frente a escenarios de elevados crecimientos poblacionales. Hoy, nuestra capacidad creativa e innovadora enfrenta un nuevo gran desafío que surge de las ne-

cesidades de satisfacer la demanda de alimentos, que continúa creciendo (Figura 35; Tabla 4) y de revertir la extralimitación en el uso de los recursos del planeta (Capítulo 3). En el próximo capítulo se analizan las posibles estrategias para alcanzar una producción sostenible, relacionadas, principalmente, con moderar dietas, reducir pérdidas y desperdicios, y aumentar la oferta de la agricultura.

5. ESTRATEGIAS PARA SATISFACER FUTURAS DEMANDAS

Existen distintas vías de acción para alcanzar el objetivo de satisfacer las futuras demandas de productos agrícolas. Una de estas vías es reducir las demandas, lo que se puede lograr a través de la moderación de la dieta (reducción en el consumo de calorías y conformación de dietas más eficientes), el descenso de la tasa de fecundidad y la reducción del uso de biocombustibles de 1.^a generación que compiten con los alimentos. Otra vía de acción de disminuir demandas a nivel de lote de producción es reducir las pérdidas y desperdicios, que alcanzan el 30% a nivel global. Las futuras demandas resultantes deben ser satisfechas con incrementos proporcionales de la producción, pero atendiendo a la vez las necesidades de reducción del impacto ambiental asociado con la actividad agropecuaria.

5.1. Reducir demandas

A continuación se analiza el efecto de la moderación de la dieta, la reducción de las pérdidas y desperdicios y la disminución de la tasa de fecundidad en las futuras demandas de alimentos o productos agrícolas. El tema de los biocombustibles de 1.^a generación fue tratado en la Sección 4.3.

5.1.1. Moderar dietas

Una manera de morigerar las futuras demandas es prescindir de dietas excesivas en energía y productos animales. Hay que evitar, por un lado, los excesos actuales de las dietas en países desarrollados y, por otro, que los países en los cuales el poder adquisitivo está aumentando tiendan a consumir dietas abundantes no saludables. Para esto es necesario romper la relación entre calorías vegetales demandadas en la dieta e ingresos presentada en la Figura 32 (Sección 4.2).

En total hay 2.100 millones de personas con sobrepeso-obesos en el mundo (Tilman y Clark, 2014; WHO, 2018) a causa de un desbalance entre calorías consumidas y utilizadas. Según otros autores,

la población con sobrepeso se acerca a los 3.000 millones, de los cuales casi un tercio son obesos (Gordon *et al.*, 2017). En escandaloso contraste, el número de personas desnutridas en el mundo es de 820 millones.

La condición de sobrepeso se da principalmente en los países con altos y medios ingresos (y en algunos sectores de bajos ingresos que consumen elevada cantidad de calorías vacías, GPAFSN, 2016), y causa globalmente más muertes que el bajo peso corporal.

La dieta constituye una variable de gran relevancia en la determinación de la demanda futura de alimentos según cálculos realizados sobre las estimaciones con base en el año 2010 (Andrade, 2016a). Si se mantiene la dieta de los países más ricos en los valores del 2010 y se mejora durante las próximas décadas la de las demás regiones hacia una relación entre calorías de origen animal/vegetal = 0,30 y 2,36 kg de EG (equivalentes grano) por persona y por día (dieta adecuada moderada), la demanda de alimentos crecería un 70 % entre 2010 y 2050 (Sección 4.4; Figura 36d). Pero si todo el mundo pasara a consumir una dieta típica del medio oeste de EUA, o sea abundante y muy rica en productos animales (relación entre calorías animales/vegetales = 0,73 y 4,21 kg de EG por habitante por día), la demanda de alimentos aumentaría 200 % entre 2010 y 2050 (Figura 36a). Las estimaciones basadas en los datos de Tilman *et al.* (2011) pronosticaban incrementos del 80 % en la demanda de calorías de cultivos entre los años 2010 y 2050 (Figura 36c). No obstante, cálculos realizados con datos de los mismos autores indican que si todas las naciones en el 2050 consumieran dietas como el promedio actual de las más desarrolladas, la demanda de calorías crecería 130 % respecto a las del año 2010 (Figura 36b).

También es muy llamativo el hecho de que la demanda de alimentos global no aumentaría hacia el año 2050 si todo el mundo pasara a consumir una dieta básicamente vegetariana (relación entre calorías animales/vegetales = 0,074 y 1,34 kg de EG por persona por día) y los excesos de las regiones ricas pudieran ser adquiridos por las menos desarrolladas (Figura 36g).

Coincidentemente, Foley *et al.* (2011) concluyen que si las 16 principales especies que cultivamos (que equivalen al 87 % de la producción total de cereales, oleaginosas, raíces y tubérculos, legumbres y granos gruesos) se dedicaran completamente a consumo humano directo, se ampliarían un 49 % las calorías disponibles para este fin. Con estos cambios, en concordancia con lo indicado anteriormente, no sería necesario expandir la producción ya que los valores de calorías producidas alcanzarían para alimentar a la población del año 2050 con una dieta básicamente vegetariana y con un 11 % de aumento en calorías disponibles promedio por habitante (Figura 36f). En la misma línea de pensamiento, si en

la actualidad los alimentos producidos estuvieran mejor distribuidos y utilizados, se podría alimentar adecuadamente a toda la población mundial (Gordon *et al.*, 2017).

Según Foley *et al.* (2011) hace 1 década la producción de cultivos se utilizaba en un 62 % para consumo humano directo, en un 35 % para alimentación animal y en un 3 % para bioenergía, semilla y otros productos. Esto significa que se dedican 350 millones de hectáreas a cultivos para alimentación animal. No obstante, existe una gran disparidad entre regiones para estos valores. Norteamérica y Europa dedican solo el 40 % de sus tierras cultivadas a consumo humano directo, mientras que África y Asia más del 80 %. Valores extremos corresponden al norte del medio oeste de EUA (< 25 %) y sur de Asia (> 90 %) (Foley *et al.*, 2011).

Entonces, una dieta rica en productos animales producidos a partir de grano o sobre tierra apta para cultivos significa una mayor presión sobre el medioambiente, básicamente debido a que la producción de carne es menos eficiente energéticamente (Lancet Commissions, 2019; Laulhe, 2015). La producción de 1 kg de carne (sustancia comestible) de pollo, de cerdo y bovina requiere 3, 9 y más de 20 kg de alimento basado en grano, respectivamente. Estos valores se calcularon teniendo en cuenta la eficiencia de conversión de kg de grano en kg de peso vivo y la relación entre kg de carne y kg de peso vivo. En términos de energía estas diferencias se amplían ya que, por ejemplo, 1 kg de grano de maíz (13 % de humedad) contiene alrededor de 350 kcal mientras que 1 kg de carne vacuna (70 % humedad) contiene entre 110 y 220 kcal según su contenido de grasa. Sin embargo, hay que considerar que la cría y parte del engorde en producción vacuna generalmente se realiza sobre pastos en tierras no aptas para cultivos.

En coincidencia, Poore y Nemecek (2018) concluyen sobre la base de cinco indicadores (uso de tierra, extracción de agua dulce, emisión de gases de efecto invernadero, acidificación y eutrofización) que los efectos ambientales de los productos animales, aun los de menor impacto, superan a los de los productos vegetales, lo que aporta claras evidencias acerca de la importancia del cambio de la dieta en el cuidado ambiental. Las emisiones de equivalentes CO₂ por kg de producto a lo largo de la cadena completa de suministro son sustancialmente menores para los vegetales que para los productos animales. Al maíz y al trigo le corresponden valores de 1,2 kg de CO₂ eq/kg de producto, mientras que al pollo, cerdo, leche y carne vacuna 6, 7, 21 y 60 kg de CO₂ eq/kg de producto, respectivamente. Dichas diferencias hacen que las emisiones debidas al transporte de los alimentos sean pequeñas en relación con aquellas debidas al tipo de producto, lo que lleva a Ritchie (2020) a concluir que lo que consumimos es mucho más importante que el lugar de producción en cuanto a determinar las



Figura 36: Incremento global de la demanda de alimentos al año 2050 expresado como % respecto a la demanda del año 2010. Estimaciones realizadas por el autor sobre datos propios, de Tilman *et al.* (2011) y de Foley *et al.* (2011).

Los incrementos se calcularon considerando para el año 2050 (UN, 2012):

a: Una dieta con relación calorías animales/vegetales = 0,73 y 4,21 kg EG *per cápita* y por día (dieta rica en productos animales, típica del medio oeste de EUA).

b: Demandas de dietas como el promedio actual de las naciones más desarrolladas. Cálculos realizados según Tilman *et al.* (2011), suponiendo incrementos lineales del 2005 al 2050.

c: La mejora del poder adquisitivo y las funciones que relacionan calorías de cultivos demandadas con el poder adquisitivo. Cálculos realizados según Tilman *et al.* (2011), suponiendo incrementos lineales del 2005 al 2050.

d: Mantener la dieta de los países más ricos en los valores del 2010 y mejorar la dieta de las demás regiones a una relación calorías animal/vegetal = 0,30 y 2,36 kg EG por habitante por día.

e: El escenario D más una reducción de pérdidas y desperdicios de alimentos del 30 al 20 %, suponiendo que los ahorros de las regiones ricas están disponibles para satisfacer demandas de las regiones más críticas.

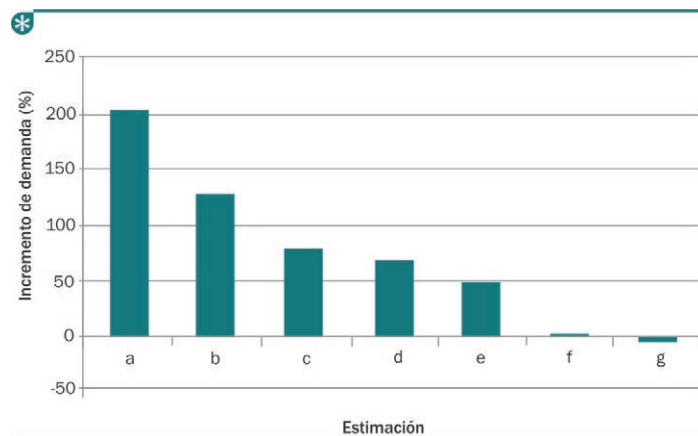
f: Un consumo humano directo del equivalente a la producción actual de los 16 principales cultivos. Cálculos basados en Foley *et al.* (2011). Esto alcanza para alimentar a la población del año 2050 con una dieta 11 % superior en calorías disponibles promedio por habitante.

g: Una dieta con relación calorías animales/vegetales = 0,074 y 1,34 EG por persona por día (dieta básicamente vegetariana).

emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura. Una excepción a esta regla la constituyen los alimentos que se transportan por vía aérea, pero estos representan una baja proporción del total producido. La producción local, sin embargo, es un factor de desarrollo y de seguridad alimentaria en los países y regiones más pobres (Sección 6.3).

Por lo tanto, alimentar a la población con dietas ricas en productos animales requiere más tierras y produce mayores emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros efectos negativos. Entonces, la cantidad de tierra con potencial agrícola dedicada a alimentar animales debe ser evaluada críticamente frente a los desafíos que enfrentamos en cuanto a satisfacer las demandas cuidando a la vez del ambiente (Godfray *et al.*, 2018; Foley *et al.*, 2011; Poore y Nemecek, 2018).

En línea con los objetivos planteados, el consumo de productos animales producidos a partir de grano o en tierras agrícolas se puede limitar sustituyéndolos por carne y productos lácteos de rumiantes producidos sobre tierras de pastizales no cultivables, las que alcanzan una superficie de 32 millones de km².



En conclusión, prescindir de dietas excesivas en energía (cantidad) y productos animales (composición) puede reducir significativamente las futuras demandas de alimentos y la presión sobre el medio.

La mencionada estrategia presenta otros beneficios relacionados con la salud humana (Lancet Commissions, 2019). Los incrementos en ingresos y la urbanización conducen a cambios dietarios en los que dietas tradicionales son reemplazadas por otras más ricas en azúcar refinada, carne y aceites (Tilman y Clark, 2014). Según estos autores, y de no producirse cambios en las tendencias,

la dieta global promedio del año 2050 tendría, relativo a la del año 2009, un 15 % más de calorías totales y 11 % más de proteínas totales, una composición 61 % mayor de calorías vacías, 18 % menor en frutas y vegetales, 2,7 % más baja en proteínas vegetales, 23 % mayor en cerdos y aves, 31 % mayor en carne de rumiantes y 58 % mayor en lácteos y huevos. Estas dietas tienen implicancias en la salud humana ya que elevan la incidencia de diabetes tipo II, de enfermedades coronarias, y de otras enfermedades crónicas no transmisibles que reducen la expectativa de vida. Las dietas alternativas más sanas, como la mediterránea, pescetariana, o vegetariana, disminuyen la tasa de incidencia de diabetes tipo II entre 16 y 41 %, la de cáncer entre 7 y 13 %, la tasa de mortalidad relativa por enfermedades cardíacas entre 20 % y 26 % y la tasa de mortalidad general para todas las causas entre 0 % y 18 % en comparación con la dieta convencional omnívora consumida en países ricos y medianamente ricos (Tilman y Clark, 2014; Lancet Commissions, 2019). Estos datos ilustran la magnitud de los beneficios en la salud asociados con el consumo de dietas más sanas y moderadas que incluyen mayor consumo de frutas y vegetales, nueces y legumbres y menor consumo de calorías vacías y carne.

Actualmente, y funcionales al menos a alguno de los objetivos mencionados, están comenzando a prevalecer sustitutos para la carne basados en proteínas de plantas, hongos e insectos, así como la carne sintética producida por técnicas de cultivo *in vitro* y de impresión 3D (Bonny *et al.*, 2017). Para incrementar la participación de proteínas vegetales en la dieta se deberá promocionar la producción y consumo de legumbres secas como la arveja, el garbanzo, la lenteja y el poroto.

La inclusión de la carne en la dieta contribuyó a la evolución del cerebro humano (Sección 2.1). Una cantidad no excesiva de carne en la dieta es recomendable por su contenido en vitaminas, minerales y nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las personas. Hoy no obstante, propender a dietas moderadas con menos consumo de carne y más consumo de productos vegetales con buenas características nutricionales y nutracéuticas tiene importantes beneficios para nuestra salud y para el ambiente (Tilman y Clark, 2014; Godfray *et al.*, 2018; Poore y Nemecek, 2018; Lancet Commissions, 2019).

5.1.2. Reducir pérdidas y desperdicios

Otra manera de evitar futuros aumentos de producción es reducir las pérdidas y desperdicios de los alimentos destinados a consumo.

Las pérdidas de alimentos se refieren a aquellas que se producen en la cadena de suministro incluyendo las etapas de cosecha, transporte, almacenamiento y procesamiento. Los desperdicios

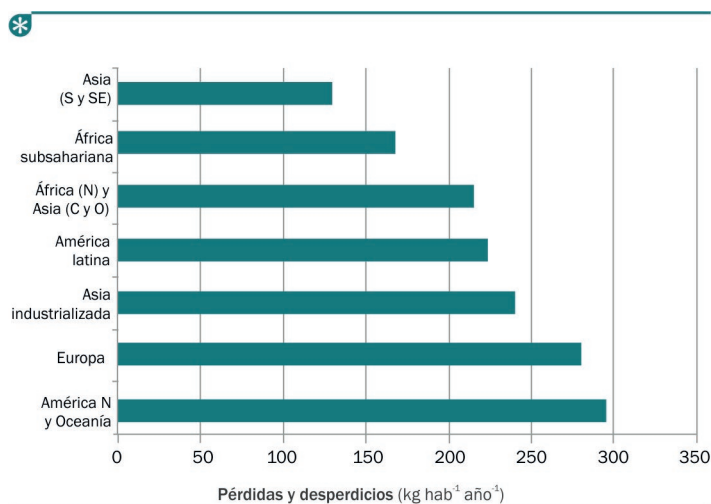
de alimentos en cambio representan las pérdidas que ocurren en el nivel minorista y en el consumo final.

Aproximadamente un tercio de los alimentos que se producen globalmente para consumo humano se pierden o desperdician (Gustavsson *et al.*, 2011; Galanakis, 2019). Estas mermas alcanzan alrededor del 45 % para frutas y hortalizas, 30 % para los cereales, 20 % para leguminosas y oleaginosas, 20 % para lácteos y carne y 35 % para pescado. Los valores varían marcadamente entre distintas estimaciones por lo que más estudios e investigaciones son necesarias para precisar su magnitud (Xue y Liu, 2019). Dados los niveles alcanzados, las pérdidas y desperdicios tienen fuertes implicancias en la sostenibilidad y en la seguridad alimentaria, ya que reflejan ineficiencias en el uso de recursos escasos como el agua, la tierra y la energía, y se asocian con todos los efectos ambientales negativos resultantes de la producción de alimentos.

Los valores absolutos de pérdidas y desperdicios por persona para uso humano directo sumando las instancias de consumo y preconsumo varían entre las distintas regiones del mundo, siendo mayores en los países más desarrollados (Figura 37). Estas diferencias, no obstante, se reducen cuando los valores se expresan como porcentaje de los alimentos disponibles debido a que estos son también mayores en los países más desarrollados.

En países industrializados, importantes mermas se producen a nivel del mercado y del consumidor final, mientras que en países de bajos ingresos, predominan las pérdidas en etapas tempranas y medias de la cadena alimenticia, principalmente en el almacenamiento y transporte (Gustavsson *et al.*, 2011; Wrap, 2008; HLPE, 2014); (Figura 38). Los desperdicios a nivel de cada consumidor se relacionan directamente con su poder adquisitivo (Xue y Liu, 2019).

Figura 37: Pérdidas y desperdicios por persona de alimentos para uso humano en las instancias de consumo y preconsumo en distintas regiones del mundo (Gustavsson *et al.*, 2011).



Estos alcanzan 105 kg por año en Europa y América del Norte mientras que apenas suman 6-11 kg por año en el Sur y SE de Asia y en África subsahariana (Gustavsson *et al.*, 2011). Otros trabajos indican pérdidas mayores (Lundqvist *et al.*, 2008; Parfitt *et al.*, 2010).

La reducción de las pérdidas y desperdicios a nivel global del 30 % actual al 20 % resulta en un 14 % más de consumo. Con esta reducción de pérdidas, y sobre la base del escenario D más arriba indicado, los incrementos de demanda entre 2010 y 2050 caerían de 70 a 49 % (Figura 36e).

En países industrializados, productores, comerciantes y consumidores pierden y desechan anualmente alrededor de 300 millones de toneladas de alimentos que aún son aptos para consumo. Este volumen sería suficiente para solucionar los problemas actuales de desnutrición del mundo.

Estos datos remarcan la relevancia de afrontar estas problemáticas, que además de producir tensiones entre la demanda y la oferta de alimentos, impactan en la eficiencia de uso de recursos, en el ambiente y en la rentabilidad de la producción.

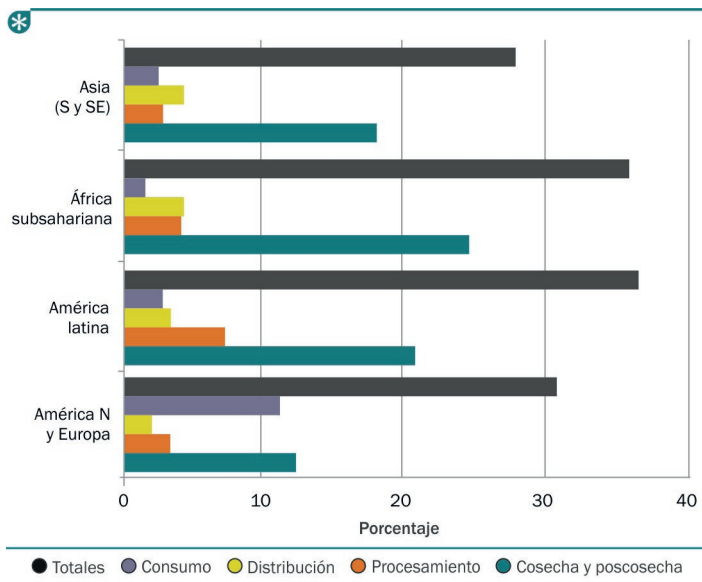


Figura 38: Pérdidas y desperdicios de alimentos para distintas regiones del mundo (Sur y SE de Asia, África subsahariana, América Latina y América del Norte y Europa). Datos expresados en porcentaje de los alimentos disponibles. Adaptado de HLPE (2014).

En países menos desarrollados se requiere principalmente solucionar problemas relacionados con las instancias de cosecha, almacenamiento, transporte, refrigeración y distribución de los productos, mientras que en los países industrializados se debe apuntar principalmente a cambiar hábitos de empresas, minoristas y consumidores, solucionar problemas de coordinación entre diferentes actores de la cadena, promover mejores y más sustentables tecnologías de procesamiento y envasado, y valori-

zar la reutilización de residuos como alimento humano, animal o fertilizante orgánico (Gustavson *et al.*, 2011; Ripple *et al.*, 2017; Galanakis, 2019). También es necesario mejorar los cultivos para que el producto cosechado sea más apto para el almacenamiento y presente mayor vida útil (EU, 2015).

5.1.3. Tasa de fecundidad

La tasa de fecundidad global fue muy alta hasta mediados del siglo XX, momento en el cual comenzó a decrecer hasta los valores actuales de 2,5 hijos por mujer. Se espera que esta variable alcance el nivel de estabilización poblacional hacia fines de este siglo. No obstante, el número de hijos por mujer se mantiene alto en algunos países, sobre todo de África subsahariana (Figura 7).

Reducciones o incrementos de 0,5 puntos en la tasa de fecundidad producen variaciones de más de 2.000 millones en la población estimada en el año 2050, por lo que tiene un fuerte impacto en el futuro requerimiento de alimentos. La presión económica en países desarrollados, expresada como necesidad de un segundo ingreso familiar, largos y costosos periodos de educación y altos costos de crianza, es un factor de disminución de la tasa de nacimientos (Kayal *et al.*, 2019). La tasa de fecundidad está asociada directamente con la pobreza e inversamente con el nivel educativo (Science, 2011; Ripple *et al.*, 2017), por lo que el desarrollo de los pueblos, basado en el respeto de la vida y la libertad, sería la manera justa e indicada para reducirla.

En regiones menos desarrolladas, los futuros requerimientos de productos agrícolas y el impacto ambiental pueden ser amortiguados si se reduce la tasa de fecundidad. Sin embargo, en función de la información presentada en los capítulos anteriores, los efectos negativos de las actividades humanas sobre el ambiente resultan en buena medida de otros factores como costumbres abusivas y de prácticas agresivas para el ambiente (Kayal *et al.*, 2019). Aun así, el crecimiento poblacional es un factor de presión sobre el ambiente, que se agravaría si se adoptan hábitos de consumo y producción no sostenibles.

5.1.4. Síntesis

La moderación de la dieta y la reducción de las pérdidas y desperdicios pueden modificar significativamente los volúmenes de alimentos requeridos hacia el 2050. En la Sección 6.1.2 se profundiza el análisis de estas posibilidades de ahorro de demanda, a nivel global y para cada uno de los continentes.

Los datos presentados marcan la relevancia de estas acciones en la futura seguridad alimentaria, ya que amplían la disponibilidad

de alimentos sin costo ambiental, y tienen potencial para mejorar tanto la salud humana como la eficiencia de uso de recursos e insumos. En concordancia, trabajos recientes indican que importantes disminuciones de demanda y ahorros potenciales de tierra cultivada se pueden lograr reduciendo los excesos de consumo y las pérdidas y desperdicios de alimentos (UNEP, 2014; Keating *et al.*, 2014; Ripple *et al.*, 2017; Lancet Commissions, 2019; Alexander *et al.*, 2019).

Una conclusión que se extrae de la información presentada es que actualmente producimos suficiente cantidad de alimentos para nutrir adecuadamente a toda la población si reducimos las pérdidas y desperdicios y moderamos las dietas. Smil (2013) y Gordon *et al.* (2017) arriban a conclusiones similares. Otra conclusión notable es que tampoco sería necesario incrementar la producción hacia el 2050 si las reducciones de pérdidas y desperdicios y de carne en la dieta fueran significativas.

La conversión completa de las dietas, la eliminación total de las pérdidas y desperdicios y la transferencia de excedentes es poco realista (Alexander *et al.*, 2019). Sin embargo, podemos trabajar para lograr progresos incrementales en lo referente a propulsar cambios dietarios y reducciones de desperdicios en países desarrollados, evitar que países en vías de desarrollo copien costumbres de los más desarrollados en cuanto a dietas excesivas y prácticas que generan altos desperdicios, evitar pérdidas de alimentos por falta de infraestructura en regiones subdesarrolladas y transferir excedentes de algunos países para cubrir déficits de otros. Estos logros serían muy beneficiosos, no solo para la alimentación y la salud de la humanidad, sino también para el ambiente a través de la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, de las deforestaciones, de la degradación de los suelos, y de la contaminación, entre otros efectos positivos. Alcanzar estos objetivos requiere acciones continuas en todos los niveles y para todos los actores involucrados, entre las que resaltan educar, informar y capacitar a la población en estas temáticas.

Hasta aquí se han descrito los efectos de la dieta, la reducción de pérdidas y desperdicios y la tasa de fecundidad en las futuras demandas de alimentos. En el próximo capítulo se presentan y discuten las estrategias productivas para incrementar la producción de manera sostenible. Dichas estrategias han surgido e inexorablemente surgirán como resultado de nuestra capacidad creativa e innovadora.

5.2. Aumentar la producción agrícola

A juzgar por las actuales tendencias (Figura 34) y por las proyecciones a futuro (Figura 35), la demanda y producción de alimentos

van a aumentar en las próximas décadas, aun teniendo en cuenta los posibles ahorros por cambios en la dieta y por reducción de pérdidas y desperdicios.

Nuestra capacidad de innovación está nuevamente a prueba ante la compleja tarea de proveer las estrategias, técnicas y acciones que garanticen el cuidado ambiental y la adecuada alimentación de la población (sin déficits ni excesos). El desafío se torna más crítico aun considerando que i) en algunas regiones se evidencian bajas tasas de incremento de los rendimientos de cultivos importantes, incluso con indicios de alcanzar techos (Cassman *et al.*, 2010; Grassini *et al.*, 2013) y ii) el cambio climático y la degradación de los recursos ejercen efectos negativos sobre los cultivos en algunas regiones críticas (Wheeler y Von Braun, 2013).

Satisfacer las futuras demandas indicadas en la sección anterior requerirá aumentar la producción global de alimentos, aunque la mayor parte de estos incrementos se deberá producir en los países en vías de desarrollo (Fischer *et al.*, 2009; Tester y Langridge, 2010).

Los aumentos requeridos de producción se pueden lograr por expansión de la superficie cultivada y por una intensificación en el uso de la tierra a través de mayores rendimientos de cada cultivo por unidad de superficie y mayor cantidad de cultivos por año. Existe amplio consenso entre los científicos acerca de no ampliar el área cultivada por los problemas indicados de emisiones de gases de efecto invernadero, generación de excesos hídricos, exposición de tierras frágiles a procesos de degradación y pérdidas de biodiversidad. Por lo tanto, los aumentos deberán producirse mediante la intensificación de la producción por unidad de área y de tiempo.

La intensificación deberá basarse en mayor medida en tecnologías de procesos fundamentadas en el conocimiento de los componentes de los sistemas productivos y de sus complejas interacciones, y en ciertas tecnologías duras, como alternativas a las tecnologías de insumos como fertilizantes, plaguicidas, combustibles y agua de riego, que predominaron en las últimas 6 décadas (Satorre y Andrade, 2020). La intensificación basada en insumos, no obstante, varió hasta ahora marcadamente entre las distintas regiones del mundo (Pellegrini y Fernández, 2018).

Los objetivos deben enmarcarse en el concepto de “Intensificación Sostenible”, es decir, satisfacer de manera sana, continua, rentable y equitativa las crecientes necesidades de la población mundial, pero haciendo un uso eficiente y seguro de los recursos naturales y de los insumos externos, de tal manera que se aseguren los servicios ecosistémicos para las generaciones presentes y futuras, se contribuya a la equidad e inclusión social, y al desarrollo equilibrado de todos los territorios (Ikerd, 1990; Tilman *et al.*, 2002; Pretty *et al.*, 2018; Arístide *et al.*, 2020). Un concepto simi-

lar es el de “Buenas Prácticas Agrícolas” definidas como aquellas acciones tendientes a i) obtener productos aptos para el consumo, sanos, inocuos y de calidad, ii) proteger el ambiente, la salud de los trabajadores y la salud pública, iii) procurar la viabilidad económica y la estabilidad social, iv) diseñar paisajes sustentables y ordenar el territorio para garantizar la conservación de la biodiversidad y la equilibrada provisión de servicios ecosistémicos.

La sostenibilidad tiene entonces tres ejes, el productivo, el ambiental y el social. Este último aspecto es discutido en la Sección 6.3.

A continuación se analizan críticamente, en función de sus aportes, a la producción y al impacto ambiental, las estrategias y acciones para el aumento de la producción. Estas incluyen la expansión de la superficie cultivada y la intensificación en el uso de la tierra por medio de incrementos de los rendimientos por unidad de superficie o de un mayor número de cultivos por año.

5.2.1. Superficie cultivada

Durante el siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, la producción agrícola creció principalmente por expansión de la superficie cultivada. El área bajo cultivo se expandió desde 3,5 millones de km² en el año 1700 hasta cerca de 14 millones de km² a mediados del siglo XX, mayormente a expensas de zonas forestales. En el mismo periodo, el área de pastoreo creció de 5 a 31 millones de km² (Goldewijk y Ramankutty, 2004). La Figura 39 muestra las principales zonas de cultivo y de pastoreo en el mundo.

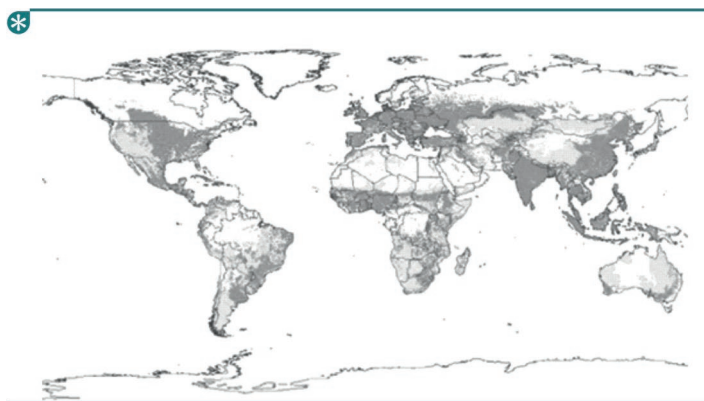


Figura 39: Principales zonas de cultivo y de pastoreo en el mundo. Gris oscuro, gris medio y gris claro representan las principales zonas de cultivo, zonas secundarias de cultivo y áreas de pastoreo, respectivamente. En blanco se indican zonas demasiado frías, demasiado secas, selvas tropicales, o zonas cubiertas por hielo, etc. (Ramankutty *et al.*, 2002, 2004 y 2008; Monfreda *et al.*, 2008; Portmann *et al.*, 2010).

En la segunda mitad del siglo XX solo se incorporaron unas 100 millones de hectáreas (ha) a la agricultura (1 millón de km²) (Fischer *et al.*, 2014). En general, los países más desarrollados intensificaron la producción en base al uso de insumos y lograron ahorrar tierra cultivada en algunos casos (Pellegrini y Fernández, 2018). El mayor aumento de superficie cultivada, por lo tanto, se

dio en países en vías de desarrollo que intensificaron poco en cuanto al uso de insumos (países de Latinoamérica y de África). Sin embargo, algunos países en vías de desarrollo, como China, Egipto y Cuba, intensificaron como los países desarrollados, pero también expandieron la superficie cultivada (Pellegrini y Fernández, 2018).

Desde principios del siglo XXI se evidencia una tasa mayor de aumento de la superficie cultivada, ya que entre 2000 y 2017 se incrementó de 1.492 millones a 1.560 millones de ha (FAO, 2020). En los últimos años, el área cultivada se redujo en América del Norte y en Europa y creció en América del Sur, África y Asia. Esta desigual tendencia de expansión tiende a continuar. Grassini *et al.* (2013) informan que la superficie cosechada de los principales cultivos (cereales, oleaginosas, y hortalizas) creció hasta 10 millones de ha por año en la primera década del presente siglo, correspondiendo el 60 % de este valor a los principales cereales.

La superficie potencialmente cultivable ronda los 33 millones de km² (Norse *et al.*, 1992) (Tabla 5). Según algunas estimaciones, la superficie de cultivos deberá expandirse entre 70 y 300 millones de ha en el periodo 2005-2050 para satisfacer las futuras demandas de alimentos (Bruinsma, 2009; Fischer, 2009; UNEP, 2014). Recientes estimaciones, no obstante, indican que la expansión requerida será menor, de unos 100 millones de ha entre 2018 y 2050 (Vos y Bellu, 2019).

Categoría	Superficie (km ²)
Área potencialmente cultivable	32.800.000
Pobrementemente productiva	19.400.000
Medianamente productiva	8.900.000
Altamente productiva	4.500.000
Área no cultivable	116.200.000
Cubierta por hielo	14.900.000
Demasiado fría	22.350.000
Demasiado seca	25.330.000
Demasiada pendiente	26.820.000
Otras áreas*	26.800.000
Área total de tierra	149.000.000
Tierra arada	15.000.000
Tierra de pastoreo	32.000.000
Bosques y selvas	41.000.000



Tabla 5: Superficie global de tierras por categorías (en km²). Datos de Norse *et al.* (1992) y Buringh y Dudal (1987). *Otras áreas incluyen zonas muy húmedas, muy pobres, o poco profundas.

Considerando además la compensación por degradación de tierras y urbanización y las demandas para otros usos, los requerimientos adicionales de nuevas áreas para cultivos hacia el 2050 pueden ser sustancialmente mayores (Bringezu *et al.*, 2010; UNEP, 2014), especialmente en los países en vías de desarrollo.

Las pérdidas de tierras agrícolas por degradación pueden superar los 5 millones de ha por año (Scherr, 1999; Bringezu *et al.*, 2010; IPSRM, 2010). La UNEP (2014) estima que, sin programas de control y restauración de la degradación, las pérdidas por esta vía serían de 90 a 225 millones de ha en el periodo 2005-2050. Los principales procesos que ocasionan la degradación del recurso suelo fueron discutidos en la Sección 3.5.

A estas pérdidas hay que sumarle la reducción de tierras agrícolas por expansión de la urbanización e infraestructura, que hoy suman unas 300 millones de ha y que sin regulaciones adecuadas puede significar 120 millones de ha adicionales perdidas para la producción de cultivos entre 2005 y 2050 (UNEP, 2014). Alrededor del 80 % de la pérdida de tierra cultivable por urbanización hacia el año 2030 tendrá lugar en Asia y África. Asia presentará el mayor valor absoluto y África el mayor porcentaje de pérdidas (D`Amour *et al.*, 2016). La situación se agrava pues las áreas a urbanizar poseen más del doble de capacidad productiva que el promedio de las tierras agrícolas.

Sudamérica y África Central disponen de extensas superficies de tierras aún no explotadas (Tabla 6) que en su mayoría corresponden a bosques tropicales con suelos muy susceptibles a la degradación (West *et al.*, 2010). La situación en estas regiones contrasta con las de Europa y Asia donde la mayor parte de la superficie con capacidad agrícola está actualmente bajo cultivo (Tabla 6).

Actualmente, se deforestan globalmente varios millones de ha por año (Sección 3.2). Sin embargo, no podemos continuar con las actuales tendencias de deforestación y degradación. La expansión de la agricultura hacia áreas sensibles a la degradación es un importante factor en el cambio global ya que tiene consecuencias importantes sobre el clima, los ciclos biogeoquímicos del carbono y nitrógeno, la regulación hídrica, y la biodiversidad (Capítulo 3). Dada la magnitud de estos efectos se requieren acciones urgentes (Ripple *et al.*, 2017; IPCC; 2019b).

La necesidad de expansión de la superficie cultivada hacia nuevas áreas se puede reducir frenando la degradación de los suelos, recuperando tierras degradadas, mejorando los rendimientos por unidad de área y tiempo, y planificando la urbanización.



Tabla 6: Área cultivada actual (fines del siglo XX), área potencial cultivable, y relación entre estas variables para distintas regiones del planeta. Datos extraídos de Buringh y Dudal (1987), Norse *et al.* (1992) y Luyten (1995). Europa incluye el área correspondiente a la ex URSS.

Región	Área	Área potencial	Relación
Millones de hectáreas			
Suramérica	103	740	7,2
Norte y Centro América	271	465	1,7
África	188	877	4,7
Oceanía	52	246	4,7
Asia	469	495	1,1
Europa	368	479	1,3
TOTAL	1451	3302	2,3

La degradación de los suelos puede ser frenada, detenida e incluso revertida mediante el descanso de los lotes, el manejo conservador de la vegetación natural, la siembra de pasturas perennes o de cultivos (simples o múltiples) que aporten materia orgánica, las técnicas de labranza conservacionista, etc. Como había sido indicado en la Sección 3.5, el 63 % del total de los 1.900 millones de ha degradadas está seriamente afectado por lo cual su restauración es lenta y costosa (UNEP, 2014). El resto (700 millones de ha) está levemente afectado, por lo que puede ser recuperado a bajo costo por medio de las prácticas indicadas.

Frenar y revertir los procesos de pérdida y deterioro de las tierras productivas es imperativo, por lo que surge la necesidad de aplicar tecnologías más acordes con la preservación y recuperación de los suelos. A pesar de la relevancia del problema, estas acciones no se están difundiendo o ejerciendo con la intensidad necesaria (De Long *et al.*, 2015).

Entre estas tecnologías se destaca la agricultura conservacionista (Hobbs, 2007; Sahrawat y Kassam, 2013) que se basa en 3 principios: i) mínimo disturbio físico del suelo, ii) superficie permanentemente cubierta con material vegetal vivo o muerto, y iii) diversificación de cultivos (rotaciones de cultivos anuales y con pasturas, cultivos de cobertura, etc.). Dichos principios están orientados a proteger el suelo de la erosión y a mejorar el contenido de materia orgánica, la fertilidad, la estabilidad de los agregados, la capacidad de retención hídrica, la infiltración, la aireación, y la dinámica de la biología de los suelos (Álvarez *et al.*, 1998; Studdert y Echeverría, 2000 y 2002; Viglizzo *et al.*, 2011; Rosegrant *et al.*, 2014). A nivel global, la agricultura de conservación cubre aproximadamente el 15,3 % de las tierras de cultivo (Borrelli *et al.*, 2017).

Las labranzas reducidas y el mantenimiento de rastrojo en superficie protegen a los suelos de la erosión hídrica y eólica y mejoran

la acumulación de agua por disminuir las pérdidas por evaporación y por escurrimiento superficial.

Los beneficios de adoptar prácticas de conservación para restringir la erosión del suelo son notables. La agricultura de conservación ha resultado en una reducción global estimada de la erosión de alrededor del 7 %, observándose los mayores efectos en Sudamérica (principalmente en Argentina), Oceanía y Norteamérica (Borrelli *et al.*, 2017).

Además, la siembra directa ha evitado que se siga perdiendo materia orgánica de los suelos, aunque no es seguro que promueva su recuperación (Steinbach y Álvarez, 2006; Álvarez *et al.*, 2014). Para evitar el deterioro de los suelos, las labranzas reducidas y la siembra directa deben estar acompañadas necesariamente por otras prácticas como, por ejemplo, adecuadas rotaciones o producciones integradas de agricultura y ganadería (Franzliebbers *et al.*, 2014; Peyraud *et al.*, 2014; Salvagiotti *et al.*, 2017). No obstante, los efectos de estas prácticas sobre los rendimientos de los cultivos varían en función del ambiente, del manejo y de las condiciones del lote (Costa *et al.*, 2015; Pittelkow *et al.*, 2015).

En los sistemas agrícolas, la inclusión de gramíneas en las rotaciones y el uso de cultivos de cobertura invernales incrementan los aportes de carbono al suelo lo que mejora su estructura, y sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Studdert y Echeverría, 2002; Wright y Hons, 2005; Aapresid, 2016; Taboada, 2017; D'Acunto *et al.*, 2018; Agosti *et al.*, 2020). Las adecuadas rotaciones agrícolas presentan también beneficios en cuanto a nutrición, dinámica del agua, control de adversidades bióticas y productividad de los cultivos (Agosti *et al.*, 2020).

Las pasturas consociadas aportan más carbono al sistema que las rotaciones de cultivos (Studdert *et al.*, 1997; Aapresid, 2016). La implementación de sistemas mixtos que alternan un periodo de cultivos, durante el cual disminuye el contenido de carbono edáfico, con un periodo de pasturas, que permite recomponerlo, es una alternativa de manejo factible que contribuye a la sostenibilidad del agroecosistema. Studdert *et al.* (1997) concluyen que un ciclo de 7 años de cultivos, en labranza de tipo convencional, seguido de 3 años de pastura, permite el mantenimiento del carbono edáfico. Además, el índice de estabilidad de agregados, indicador de salud del suelo muy relacionado con sus propiedades físicas, manifiesta similar comportamiento (Tourn *et al.*, 2019). Las rotaciones de cultivos con pasturas presentan ventajas o beneficios en cuanto a materia orgánica, fertilidad y estructura de suelo, pero además para la nutrición y la dinámica del agua de los cultivos, el control de adversidades bióticas, el menor uso de agroquímicos, la reducción de excesos hídricos, la biodiversidad,

la diversificación de la producción y la recirculación de nutrientes (Lemaire *et al.*, 2014).

Los sistemas de labranza cero y la inclusión de cultivos de cobertura durante la fase de cultivos de cosecha permiten bajar la frecuencia de años de pasturas en la rotación sin afectar la formación y estabilización de los agregados del suelo (Tourn *et al.*, 2019). La ampliación resultante del periodo bajo cultivos de cosecha mejora la eficiencia productiva del sistema.

Las ventajas de los sistemas mixtos que incluyen rotaciones de cultivos con pasturas se contraponen con las desventajas derivadas de las emisiones de GEI y de las ineficiencias energéticas de la producción animal enunciadas en la Sección 5.1.1 (Poore y Nemecek, 2017). La adecuada valoración y ponderación de los costos y beneficios de estos efectos permitirá la optimización de los sistemas de producción de alimentos a largo plazo.

Otras técnicas de gran utilidad para frenar y revertir los procesos de pérdida y deterioro de las tierras productivas son los cultivos en franjas, las terrazas, la potenciación de la fijación biológica de N, el reciclaje de nutrientes y biomasa, las técnicas de captura de agua, los riegos eficientes, el manejo y remediación de suelos sódicos y salinos, la biofitorremediación de suelos contaminados con productos químicos, etc. (Abrol *et al.*, 1988; Postgate, 1998; Hatfield y Sauer, 2011; Rosegrant *et al.*, 2014; Tittonell, 2013; Bhatnagar y Kumari, 2013; Eevers *et al.*, 2017). Además, la fertilización con buenas prácticas permite revertir la pérdida de fertilidad de los suelos (Cassman *et al.*, 2002; Rosegrant *et al.*, 2014).

En general, implementar las prácticas sostenibles indicadas otorga además beneficios en cuanto a adaptación y mitigación frente al cambio climático (IPCC, 2019c). Las técnicas que resultan en un incremento del contenido de materia orgánica edáfica pueden ser una vía para secuestrar carbono y así contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero. Un mayor secuestro de C se puede lograr aumentando el crecimiento de las plantas y la proporción de dicho crecimiento que se convierte en C orgánico del suelo. El balance positivo de este componente se promueve a través de la estabilización y protección de la materia orgánica edáfica y de la reducción de la erosión (Lal, 2019). Los valores de estabilización de carbono en el suelo son mayores cuanto mayores son las precipitaciones y los contenidos de arcilla y limo y menores las temperaturas (Lal, 2004).

El contenido de C en los suelos del mundo hasta 1 m de profundidad es de 2.400 Gigatons (Gt), valor superior al de la atmósfera (867 Gt) y al de las plantas (560 Gt). El contenido de C edáfico del mundo debería aumentar casi 0,4 % por año para compensar las emisiones anuales de C por quema de combustibles fósiles, que

suman 8,9 Gt (o 33 Gt de CO₂) (Minasny *et al.*, 2017). Dicho valor de secuestro de C se calculó considerando todos los suelos del mundo hasta 1 m de profundidad. Sin embargo, el potencial para incrementar el C edáfico se limita a las tierras bajo producción agropecuaria. El potencial de secuestro de C considerando solo estas tierras es de 2 a 3 Gt por año, lo que contrarrestaría hasta un tercio de las mencionadas emisiones de CO₂ (Minsany *et al.*, 2017). En desacuerdo con estas afirmaciones, Schlesinger y Amundson (2019) calcularon que la aplicación de las técnicas más promisorias de manejo de suelos puede contrarrestar no más del 5 % de las emisiones anuales por quema de combustibles fósiles. Según He *et al.* (2016), muchos trabajos y modelos habrían sobreestimado el potencial secuestro de carbono por parte de los suelos para el presente siglo debido a una importante subestimación de la edad media del carbono edáfico. También surgen cuestionamientos asociados con el nitrógeno necesario para aumentar la materia orgánica del suelo (Van Groenigen *et al.*, 2017).

Entre las estrategias para proteger y recuperar los suelos y balancear las emisiones de GEI para el sector agropecuario están la forestación y reforestación-restauración, la reducción de la tasa de deforestación y de degradación de bosques y la mejora del manejo forestal. El IPCC (2019a) supone, para los máximos impactos potenciales, tasas globales de secuestro en biomasa vegetal y suelo de 9 a 10 Gt de CO₂ por año por forestar o por reforestar-restaurar, aunque estos niveles afectan negativamente la seguridad alimentaria por requerir tierras de cultivo. Un bosque cultivado puede secuestrar cerca de 30 t netas de CO₂/ha/año durante su periodo de rápido crecimiento (Kaul *et al.*, 2010) aunque este valor varía en función de la especie y del ambiente. El balance final de CO₂ depende del manejo del bosque y del transporte, transformación y uso de la madera. La superficie actual de bosques cultivados es de 290 millones de ha y se plantan globalmente unas 4,5 millones de ha anuales. La importante caída de la tasa de deforestación en la selva amazónica, que pasó de 19500 km² año⁻¹ (promedio de 10 años hasta 2005) a 5843 km² año⁻¹ en 2013 (Nepstad *et al.*, 2014) evitó la emisión de 3,2 Gt de CO₂ a la atmósfera, la degradación de suelos y una importante pérdida de biodiversidad. No obstante, la deforestación en determinadas regiones continúa ocurriendo para satisfacer necesidades locales y para exportar commodities en momentos de altos precios (Byerlee *et al.*, 2014).

Las actuales preocupaciones y legislaciones sobre la expansión de la superficie cultivada (Bringezu *et al.*, 2010) asociada con pérdida de biodiversidad, emisiones de gases de efecto invernadero, excesos hídricos y degradación de suelos, llevan a limitar la expansión de la superficie cultivada. Según la UNEP (2014) la superficie cultivada solo puede expandirse hasta 1640 Mha para cumplir con la meta de frenar las pérdidas de biodiversidad.

Esto se puede lograr en parte limitando la futura demanda de productos agrícolas a través de la moderación de las dietas, la reducción de pérdidas y desperdicios de alimentos, y la regulación del consumo de biocombustibles y biomateriales. Estos temas fueron tratados en el Capítulo 4 y en la Sección 5.1. Además, los aumentos requeridos de producción agrícola deben alcanzarse principalmente a través de la intensificación en el uso de la tierra, favorecida por el desarrollo tecnológico.

Tenemos que recurrir, entonces, a nuestra capacidad creativa e innovadora para obtener mayores rendimientos de los cultivos por unidad de superficie y por unidad de tiempo. Si la futura demanda se satisface principalmente por estas vías se reducirían drásticamente las expansiones de la superficie cultivable y las deforestaciones así como sus efectos negativos resultantes (Tilman *et al.*, 2011).

5.2.2. Intensificación en el uso de la tierra

Satisfacer las futuras demandas de productos agrícolas requerirá intensificar el uso de la tierra. Esta intensificación puede darse por aumentos en los rendimientos de los cultivos por unidad de superficie y por mayores rendimientos por unidad de tiempo a través de sembrar y cosechar más cultivos por año. Para incrementar los rendimientos por unidad de superficie se pueden utilizar tecnologías de insumos como fertilizantes, plaguicidas, combustibles y agua de riego, o bien, preferentemente, aquellas que resulten en mayor productividad por unidad de recurso o insumo disponible y mayor cuidado ambiental. Entre estas últimas se destacan el mejoramiento genético, la biotecnología y principalmente, las tecnologías de procesos basadas en el conocimiento de los sistemas de producción.

5.2.2.1. Rendimiento por unidad de superficie

Los rendimientos promedio globales por unidad de superficie han aumentado notablemente durante la segunda mitad del siglo XX como consecuencia del proceso de la revolución verde (Figura 12b).

Promediando datos publicados en distintos trabajos sobre la evolución de los rendimientos por unidad de superficie de varios cultivos en las últimas décadas se obtienen aumentos globales, expresados en $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, de 82 para maíz, 28 para trigo, 41 para arroz y 28 para soja (Fischer y Edmeades, 2010; Fischer *et al.*, 2014; Ray *et al.*, 2013).

Los rendimientos promedios de cinco de los principales cultivos han crecido en las últimas décadas en el mundo y en los distintos continentes (Figura 40). África es el más relegado en este aspecto, principalmente para los cultivos de maíz, arroz y papa.

Como ejemplos emblemáticos de la respuesta a la inversión pública y privada en investigación y desarrollo agrícola se destacan los incrementos de rendimiento de maíz en Iowa ($214 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y de trigo en el Valle de Yaqui en México ($49 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Fischer y Edmeades, 2010). Estos logros se explican por mejoramiento genético, por manejo de los cultivos y por la interacción entre ambos factores.

Los rendimientos de los cultivos sin duda continuarán progresando en los años venideros. No obstante, existe preocupación por la desaceleración de las tasas de incremento relativo de los rendimientos medios de los principales cereales en algunas regiones. Varios autores indican evidencias de techos de rendimiento o de abruptas caídas de las tasas de incremento en países que aportan un tercio de la producción total de cereales (Cassman *et al.*, 2010; Grassini *et al.*, 2013). De modo similar, Fischer *et al.* (2014) muestran que las tasas relativas (compuestas) de aumento de los rendimientos de varios cultivos se han frenado y caído por debajo del 1 % por año. Excepciones a esta regla son los cultivos de maíz, mandioca, remolacha azucarera, canola, aceite de palma, y soja, entre otros. A pesar de aquellas evidencias, el rendimiento promedio global de los principales cultivos continuó creciendo entre 2010 y 2018, observándose en muchos casos, según el cultivo y el continente, tasas simples anuales mayores o iguales que las correspondientes a décadas previas (Figura 40).

Para satisfacer solo por esta vía las ampliaciones de alimentos de productos agrícolas del 47 % estimadas en la Sección 4.4 para el periodo 2018 al 2050, los rendimientos de los cultivos deben aumentar globalmente a razón de 1,3 % por año (tasa compuesta) o con una tasa simple anual del 1,55 % del rendimiento del año 2018. De acuerdo con estas estimaciones, Hall y Richards (2013) sostienen que las tasas relativas (compuestas) de incremento de rendimiento requeridas para satisfacer las futuras demandas de cereales para alimentación humana y animal en el año 2050 oscilan entre 1,16 y 1,31 % por año.

Los rendimientos globales de los principales cultivos han aumentado entre 2010 y 2018 a una tasa simple promedio anual de 1 % para arroz y soja, 1,8 % para maíz, 1,6 % para trigo, y 2 % para papa (tasas calculadas a partir de la información de la Figura 40 y expresadas como porcentaje del rendimiento del año 2010). O sea que, a nivel global, los rendimientos de algunos de los principales cultivos están aumentando con tasas suficientes para satisfacer las futuras necesidades. Con cierta discrepancia, Cassman y Grassini (2020) sostienen que la tasa de incremento de los rendimientos globales de los principales cultivos debe acelerarse 30 % para satisfacer las futuras demandas sin expandir la superficie cultivada ni la proporción de cultivos múltiples. No obstante, la situación a

futuro es diferente para cada cultivo y los incrementos actuales y potenciales difieren marcadamente entre continentes y países. Además, las estimaciones pueden variar según el método de cálculo y las proyecciones futuras dependen fuertemente de coyunturas políticas, de la relación de precios y costos, del desarrollo tecnológico, de la adopción de tecnología y del cambio climático, entre otros factores (Sadras *et al.*, 2009).

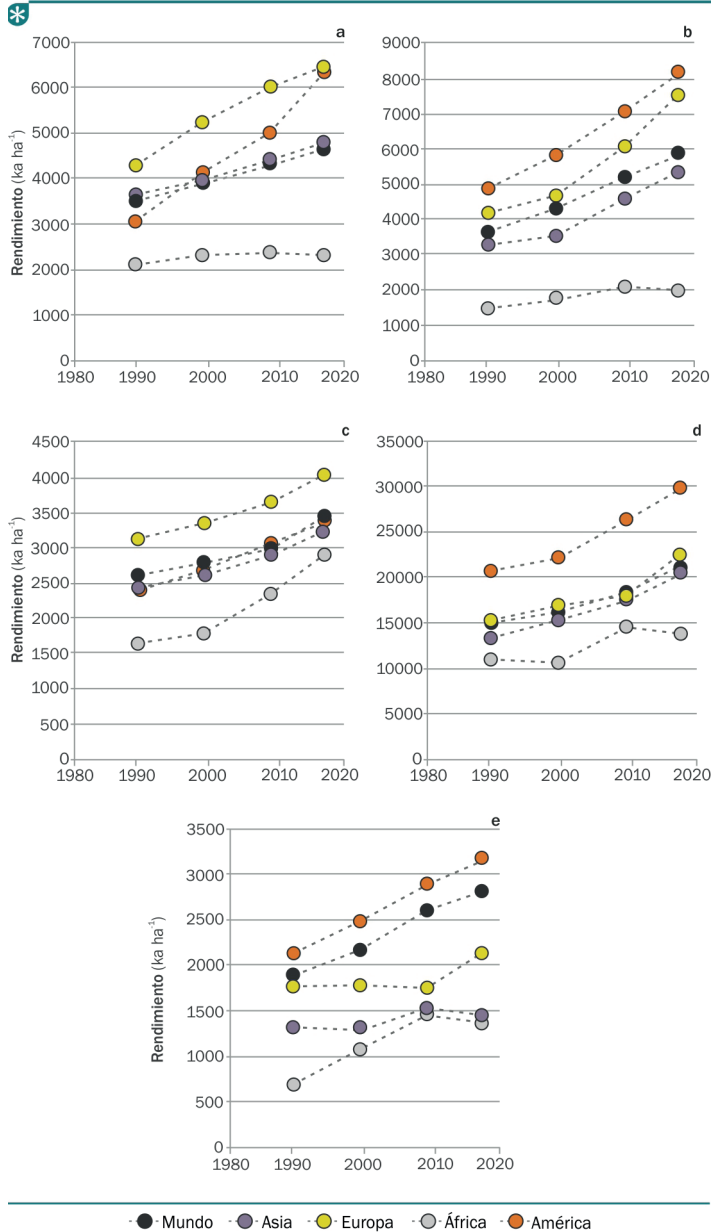


Figura 40: Evolución de los rendimientos promedios de arroz (A), maíz (B), trigo (C), papa (D) y soja (E) desde 1990 a 2018 para el mundo (círculos negros), África (círculos grises), América (círculos naranjas), Asia (círculos violetas), y Europa (círculos amarillos). Datos de FAO (2020).

Algunos autores estiman que los aumentos de rendimiento por unidad de superficie aportarán cerca del 80 % del aumento global requerido en producción agrícola para el 2050 (Bruinsma, 2009; Vos y Bellu, 2019), lo que remarca la importancia de esta estrategia para la futura seguridad alimentaria. Los mayores rendimientos reducen las necesidades de ampliar la superficie agrícola, lo que brinda beneficios en cuanto a frenar la deforestación, disminuir la pérdida de biodiversidad y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, entre otras ventajas.

En algunos casos, dichos incrementos de rendimiento pueden requerir el acompañamiento de regulaciones para que los mayores beneficios económicos resultantes no lleven a ampliar la superficie cultivada (Byerlee *et al.*, 2014; Pellegrini y Fernández, 2018).

5.2.2.2. Rendimiento potencial y cierre de brechas

Los rendimientos de los cultivos pueden aumentar por las mejoras de los rendimientos potenciales en condiciones de riego o secano (Y_p) y por el cierre de la brecha (B) entre los rendimientos reales (Y_r) y los potenciales. El rendimiento potencial de secano es el rendimiento que se obtendría sin limitaciones nutricionales o bióticas y con manejo optimizado. En el caso de rendimiento potencial de riego, a estas condiciones se les suma la de sin limitaciones hídricas. La brecha de rendimiento se calcula como $Y_p - Y_r$ y puede expresarse como porcentaje de Y_r o de Y_p . Mientras que los rendimientos reales suelen obtenerse mediante estadísticas oficiales relevadas a nivel local (distrito), la estimación de rendimientos potenciales reviste mayor complejidad. Estos últimos se pueden estimar por i) ensayos a campo con las últimas variedades, ii) distribución observada de rendimientos de productores, iii) los máximos obtenidos en las mismas condiciones de suelo y clima para las actuales tecnologías y prácticas de manejo, o iv) modelos de simulación. Estos modelos generalmente se utilizan ante la falta de datos experimentales y de producción.

Las brechas entre los rendimientos reales y potenciales, expresadas como porcentaje de los rendimientos reales suelen ser bajas (<30 %) en áreas de producción con amplia disponibilidad de agua y altamente tecnificados, como por ejemplo, trigo en el Reino Unido o maíz en Iowa (EUA), y pueden alcanzar valores superiores al 200 % en regiones menos desarrolladas en las que no se produjo el proceso de la revolución verde, como por ejemplo, África subsahariana (Fischer y Edmeades, 2010; Fischer y Connor, 2018; GYGP, 2020; Figura 41; Tabla 7). Para el mundo en su conjunto, la brecha ponderada, expresada como porcentaje de los rendimientos reales, es 88 % (Figura 41).

Según Fischer *et al.* (2014), las brechas promedio mundiales expresadas como porcentaje de los rendimientos reales y ponderadas por producción fueron, para el año 2010, 50 % en trigo, 72 % en arroz, y 98 % en maíz. Estas brechas se han cerrado en las últimas décadas, ya que las tasas de incremento de los rendimientos potenciales fueron menores a las de los rendimientos reales (Fischer *et al.*, 2014).



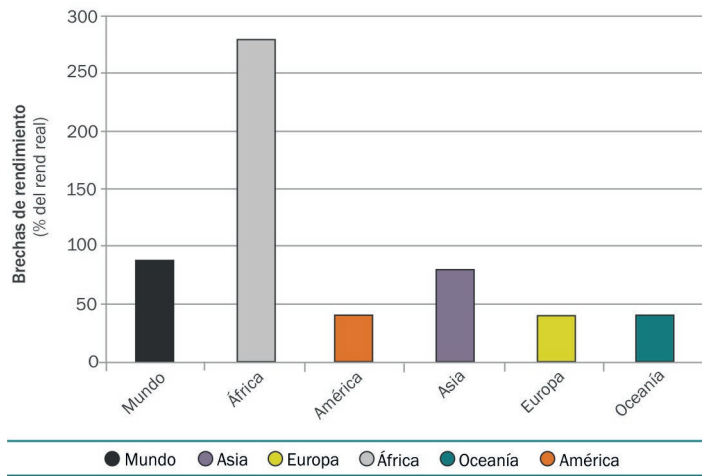
Tabla 7: Brechas de rendimiento para maíz de secano, maíz bajo riego, trigo, soja, arroz de secano y arroz bajo riego para distintas regiones. Brechas expresadas como porcentaje de los rendimientos reales. Para las regiones, se tomaron promedios de países ponderados por área. Los rendimientos potenciales de riego y secano necesarios para el cálculo de las brechas se obtuvieron mediante modelos de simulación de cultivos. NAMO = Norte de África y Medio Oriente. Datos extraídos del Yield Gaps Project (GYGA, 2020).



	Maíz Secano	Maíz Riego	Trigo Secano	Soja Secano	Arroz Secano	Arroz Riego
	%					
EUA	28	19		43		
S América	72		75	67		
Europa	43	37	67			
África Subs	400		186		233	150
Asia	82	82			100	67
NAMO		150	163			
Australia			108			



Figura 41: Brechas de rendimiento de los cultivos más importantes expresadas como porcentaje de los rendimientos reales para los 5 continentes. Para el cálculo de la brecha mundial se ponderaron los valores de los continentes por el volumen de producción. Datos extraídos y adaptados de Fischer y Connor (2018).



Las principales causas de las brechas son baja fertilidad y baja capacidad de retención hídrica del suelo, estrés hídrico, mal manejo de cultivos, adversidades bióticas, bajo nivel de insumos, deficiente capacitación de los productores, limitaciones en infraestructura, investigación y extensión agropecuaria, bajos precios al

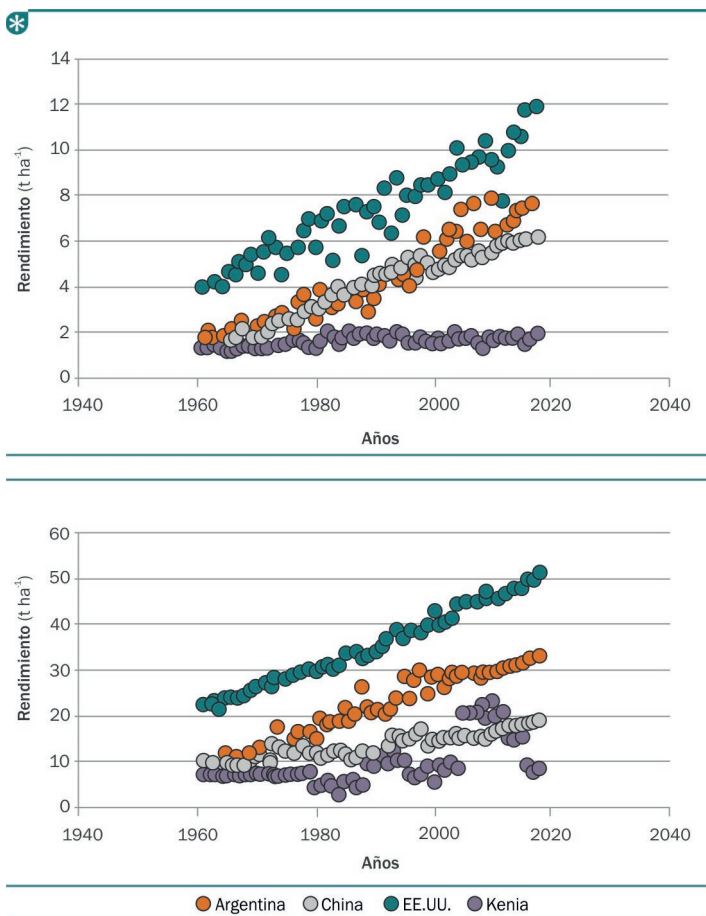


Figura 42: Rendimiento de maíz (arriba) y de papa (abajo) en función de los años desde 1960 hasta 2010 para Estados Unidos, Argentina, China y Kenia (FAO 2020).

productor, clima impredecible y políticas no apropiadas (Mueller *et al.*, 2012; Fischer *et al.*, 2014).

Tomando como ejemplo al maíz, en muchas regiones y países del mundo los rendimientos medios son bajos (Figuras 42 y 43), y un importante volumen de cereales se obtiene bajo estas condiciones (Figura 44). Esto indica que la magnitud del aporte a la producción por cierre de brechas puede ser importante (Otegui *et al.*, 2015).

Cálculos realizados sobre datos de la FAO para el año 2018 muestran que se obtendrían 248 millones de t adicionales de maíz (22 % de incremento) por elevar a la media mundial actual (5,9 t/ha) los rendimientos de todos los países cuyos rindes son inferiores a dicho valor medio. Además, si los rendimientos de todos los países con rendimientos menores a 7 t/ha se llevaran a este valor, la expansión

de la producción total del cultivo sería de casi 400 millones de t, lo que significa un 34 % de la producción del año 2018.

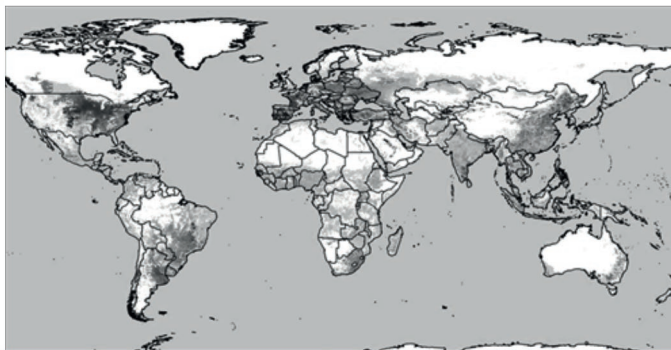


Figura 43: Rendimientos de maíz en las distintas regiones del mundo. La intensidad del color gris indica el nivel de rendimiento (< de 1 a 15 t/ha). Elaborado a partir de datos de IFPRI, 2019.

El rendimiento promedio del maíz producido globalmente ha aumentado casi 6 %, de 5600 a 5920 kg/ha, entre 2014 y 2018 (Figura 40). Importantes incrementos se han observado para otros cultivos también (Figura 40 y 42).

Estimaciones realizadas en distintas regiones de Argentina, basadas en modelos de simulación de cultivos adecuadamente calibrados y validados, datos de suelos y clima y manejos de cultivos según recomendaciones de referentes zonales, indican que los rendimientos reales alcanzan el 59 % (trigo y maíz) y el 68 % (soja) de los potenciales de secano (Aramburu Merlos *et al.*, 2015a, b). La magnitud de las brechas varió sustancialmente entre zonas climáticas, siendo estas mayores en el norte y oeste del país, donde la agricultura se expandió recientemente y menores en la región central, zona de mayor tradición agrícola y con clima más estable y benigno (Aramburu Merlos *et al.*, 2015a, b). Para el cultivo de maíz, el rendimiento potencial promedio en secano que se simuló fue de 11,6 t/ha y el rendimiento potencial sin limitaciones hídricas fue de 16 t/ha. De acuerdo con el rendimiento medio logrado de 6,8 t/ha de las últimas campañas, la brecha de rendimiento en secano sería 4,8 t/ha.

En términos más generales, Foley *et al.* (2011) estimaron años atrás que cerrar las brechas por subir los rendimientos de los 16 principales cultivos al 95 % de los máximos obtenidos en las mismas condiciones de suelo y clima para las actuales tecnologías y prácticas de manejo, produciría un crecimiento del 58 % en la producción. Si los rendimientos subieran al 75 % de los máximos por cierre de brechas, el incremento de la producción sería de 28 %.

Existe consenso en que las brechas pueden cerrarse hasta 80 % del Yp dado que reducirlas aún más implicaría un excesivo uso de insumos que no es viable económicamente para el productor y es

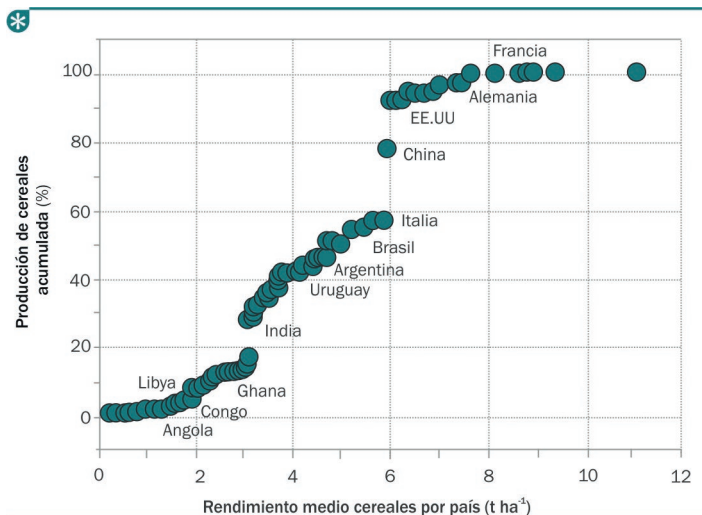


Figura 44: Producción mundial de cereales acumulada (en porcentaje) en función del rendimiento medio de cereales por país. Elaborado con datos de FAO (2014).

potencialmente dañino para el medioambiente. Además, los sistemas de producción en ambientes inestables y sin acceso a riego representan mayores riesgos para los productores, lo que explica por qué adoptan manejos más conservadores que determinan una mayor brecha.

Los cálculos de las brechas de rendimiento, junto con el análisis de sus causas, dan indicios sobre las estrategias a seguir para aumentar los rendimientos.

5.2.2.3. Tecnologías de insumos

Los notables incrementos en la producción agrícola durante la segunda mitad del siglo XX se debieron en gran medida a un mayor uso de insumos externos (Sección 2.7) entre los que se destacan los fertilizantes, los plaguicidas, los combustibles fósiles y el agua de riego.

En muchos países de regiones menos desarrolladas, especialmente de África, la proporción de superficie irrigada y el uso de fertilizantes y de plaguicidas por unidad de superficie es escaso (Figuras 45 y 46) (De Janvry, 2010; FAO 2020), siendo estos factores importantes causales de los bajos rendimientos (Oerke, 2006; Cassman *et al.*, 2002, Edmeades, 2013). Estos valores contrastan con los de otras regiones como Europa, Norteamérica y partes de Asia (especialmente China) donde el uso de insumos es muy elevado.

Entonces, las actuales tecnologías de insumos pueden contribuir al cierre de brechas entre los rendimientos reales y potenciales. La magnitud de las brechas indicadas anteriormente da indicios sobre el aporte potencial de estas tecnologías a la producción de alimentos.

Con el fin de dimensionar el impacto potencial de las tecnologías de insumos se analizan a continuación los efectos de las adversidades bióticas, el riego y la fertilización sobre el rendimiento de los cultivos.

Las adversidades bióticas producen pérdidas globales de rendimientos potenciales de 68 % siendo estos daños mayores en los países en vías de desarrollo (Oerke, 2006; Tabla 2). Los plaguicidas reducen estas pérdidas a la mitad (al 31 %), aunque controles más efectivos pueden disminuirlas aún más.

Los cultivos de secano rinden en promedio cerca de un 65 % menos que los regados (FAO, 2014), por lo que el riego, que va acompañado por un mayor uso de otros insumos, puede tener un fuer-

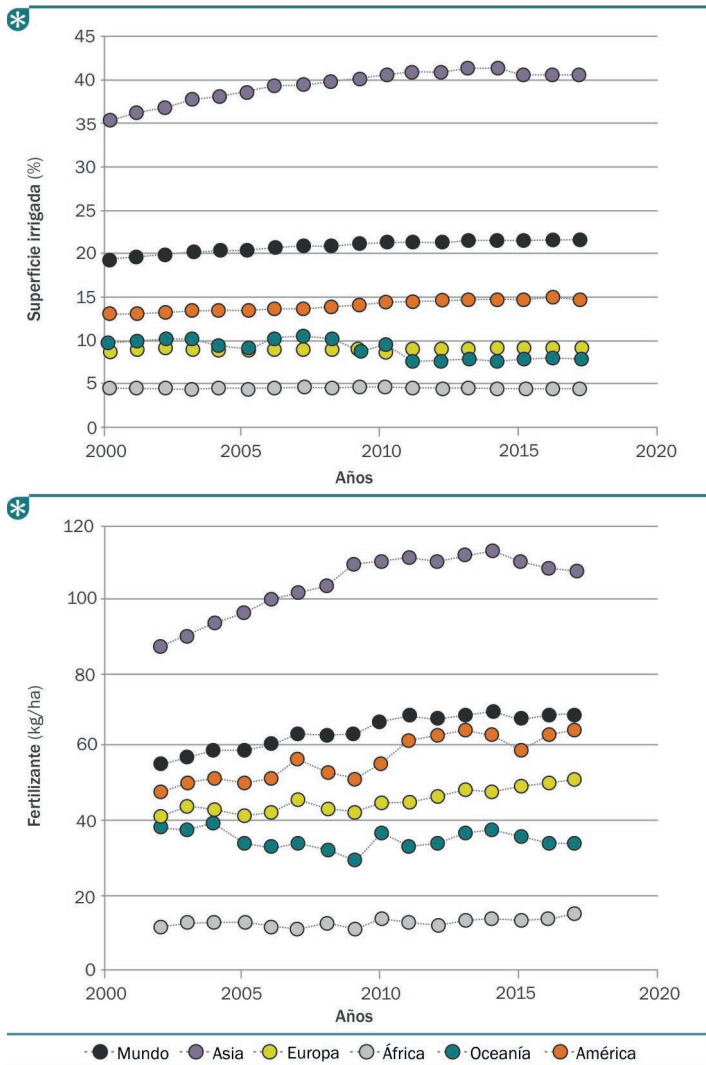


Figura 45: Superficie equipada para irrigación (expresada como porcentaje de tierras de cultivos) y uso de fertilizante nitrogenado (en kg/ha de N) para distintos continentes (FAO, 2020). África subsahariana presenta valores inferiores al promedio del continente tanto para superficie irrigada como para uso de fertilizantes por unidad de superficie.

te impacto sobre la producción, dependiendo de las posibilidades de expansión de la superficie irrigada que hoy representa el 20 % del área cultivada total. El riego se expandió notablemente durante el siglo pasado. No obstante, dicha expansión se frenó en la década de 1980 por altos costos, salinización de suelos y agotamiento de fuentes de agua. Varios autores pronosticaban años atrás expansiones entre 11 y 22 % en la superficie global bajo riego para las siguientes décadas (Shiklomanov, 2000; Bruinsma, 2009). Sin embargo, recientes estimaciones indican que la expansión de la superficie agrícola bajo riego está disminuyendo marcadamente y que el área equipada para riego en el mundo aumentaría solo 6 % entre 2009 y 2050 (FAO, 2017; Vos y Bellu, 2019).

Estos aumentos pueden ser mayores en algunos países en vías de desarrollo. Según You *et al.* (2011), África podría casi triplicar su superficie regada (de 13 a 37 millones de ha) de manera económicamente viable en los próximos 50 años.

Por último, la proporción de los rendimientos atribuibles al uso de fertilizantes minerales comerciales ronda el 50 % en EUA y Europa e incluso más en algunos países tropicales (Stewart *et al.*, 2005). Por lo tanto, la fertilización puede aumentar sustancialmente los rendimientos de los cultivos en los países en los que aún no se generalizó el uso de esta práctica (Figura 45).

Los datos presentados dan una idea de la magnitud de los posibles efectos de las tecnologías de insumos en la producción, sobre todo en las regiones menos desarrolladas. No obstante, las técnicas interactúan marcadamente y se complementan. En las regiones donde los suelos están muy degradados, los cultivos casi no responden a la aplicación de fertilizantes y las leguminosas fijan

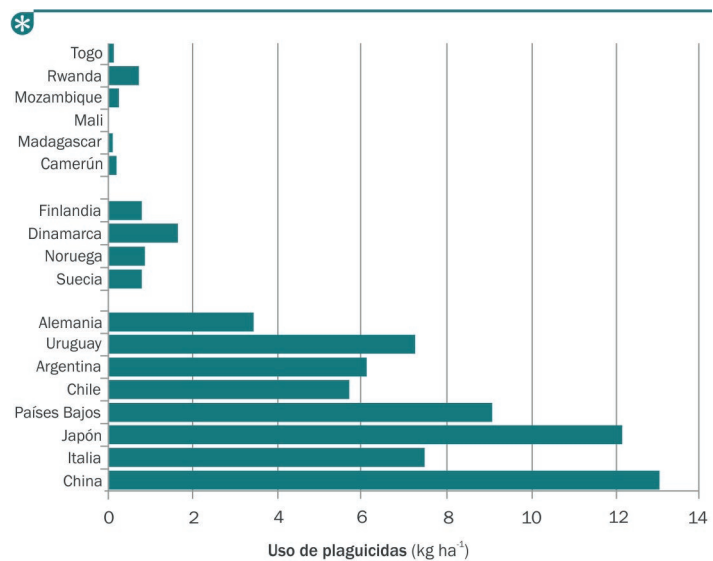


Figura 46: Uso de plaguicidas en kilogramos de principio activo por hectárea en distintos países del mundo en el año 2010. La utilización de insumos plaguicidas es baja en muchos países africanos por escaso desarrollo tecnológico y en países nórdicos por regulaciones para reducir contaminación (FAO, 2014).

poco N. En estos casos, lo más urgente y necesario es mejorar la estructura del suelo a través de incorporaciones de materia orgánica y la disponibilidad de agua utilizando adecuadas técnicas de captura del recurso. Luego de estas mejoras, los cultivos muestran respuesta a la aplicación de fertilizantes (Tittonell, 2013).

La implementación de estas tecnologías de insumos requiere políticas adecuadas, inversiones en infraestructura, desarrollo del sector, y capacitación de los productores, entre otras acciones.

En la medida en que las brechas se cierran, aumentar los rendimientos a través del uso de insumos se torna cada vez más costoso, ineficiente y contaminante. Las tecnologías de insumos, por el volumen aplicado y la mala utilización, trajeron aparejados problemas de contaminación ambiental que alcanzó niveles serios en distintas regiones del mundo (Sección 3.4) (Foley *et al.*, 2011; Ripple, 2017). Además, los recursos hídricos y los fertilizantes minerales (por ej. los fosforados) se tornan cada vez más limitantes.

Entonces, para satisfacer futuras demandas y reducir el impacto ambiental es necesario recurrir a tecnologías que resulten en mayor productividad de insumos y recursos, y que contemplen la reducción del uso de insumos externos de síntesis química o no renovables y el rediseño de los agroecosistemas con el fin de alcanzar una producción sostenible. Entre estas se destacan ciertas tecnologías “duras” y sobre todas aquellas basadas en conocimientos y procesos.

5.2.2.4. Intensificación sostenible: aumentar los rendimientos y reducir el impacto ambiental

En la literatura internacional, muchos expertos hoy coinciden en que los incrementos necesarios de producción deben lograrse por rendimientos mayores y más estables en las actuales áreas agrícolas, minimizando y revirtiendo el impacto ambiental, y utilizando más eficientemente los recursos e insumos (Ikerd, 1990; Postel, 1998; Foley *et al.* 2011; Garnett *et al.* 2013; Smith 2013; Rosegrant *et al.*, 2014; Pretty *et al.*, 2018). Esto se enmarca en el concepto de intensificación sostenible (Sección 5.2), estrategia que permite aumentar producción y rentabilidad y a la vez mejorar la situación ambiental (Pretty *et al.*, 2018; Cassman y Grassini, 2020). Para alcanzar estas metas y no sobrepasar los umbrales de seguridad del planeta (Rockström *et al.*, 2009a) se requiere incrementar la productividad de insumos y recursos, reducir el uso de insumos de síntesis química, rediseñar los sistemas productivos e incorporar la escala de paisaje (Pretty *et al.* 2018; Cassman y Grassini, 2020; Tittonell, 2018).

La estrategia de producción deberá basarse en mayor medida en tecnologías que produzcan “saltos de curva” en la relación entre el

rendimiento y los recursos/insumos disponibles. Entre estas tecnologías se destacan las de procesos basados en conocimientos y tecnologías duras como el mejoramiento genético y la biotecnología que a la vez muestran fuertes sinergismos. Otras tecnologías duras novedosas como la robótica, los sensores, la geoespacial, la información, comunicación y conectividad, la informática, *big data*, la inteligencia artificial, las nanotecnologías, la energía solar, la digitalización del agro, entre otras, son promisorias y poseen un gran potencial de interacción con las tecnologías de conocimientos y procesos (Satorre y Andrade, 2020).

En cuanto a los conocimientos, enfatizamos aquellos relacionados con el ambiente, el funcionamiento de los cultivos, la biología de las plagas y las interacciones entre los componentes del sistema. Estos conocimientos son fundamentales para el desarrollo, selección y aplicación de las tecnologías de procesos asociadas con el manejo del suelo (Sección 5.2.1) y de los cultivos, las rotaciones, la intensificación en el número de cultivos por año, el manejo integrado de plagas, las producciones ecológicas y las buenas prácticas de utilización de insumos. Contribuyen, además, a los progresos en el campo del mejoramiento genético y de la biotecnología y al mejor aprovechamiento de las tecnologías duras novedosas anteriormente indicadas. También es necesario mejorar nuestro entendimiento acerca de cómo las tecnologías específicas que se desarrollen afectan los factores de producción en cada situación y cómo se pueden revertir posibles efectos negativos.

Las mencionadas tecnologías (de procesos y conocimientos y duras), englobadas en una estrategia común, pueden contribuir a alcanzar el objetivo de satisfacer demandas crecientes de productos agrícolas, incrementar la productividad de recursos e insumos y reducir el impacto ambiental.

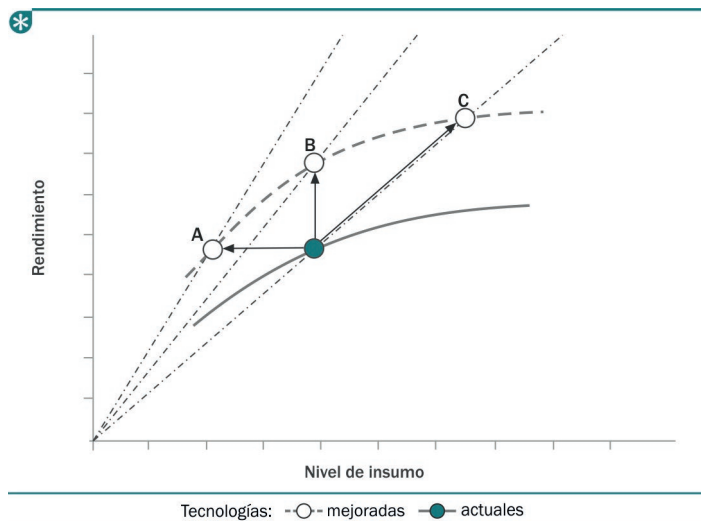
A continuación se discute acerca de la productividad de insumos, aspecto de alta relevancia para el manejo agronómico porque tiene implicancias en la rentabilidad de los cultivos y, sobre todo, en la calidad del ambiente.

La productividad de un insumo, por ejemplo un fertilizante, generalmente disminuye en respuesta al incremento en su disponibilidad siguiendo la ley de rendimientos decrecientes (Ferreira, 2015; Abbate y Andrade, 2015). Por lo tanto, aumentar la producción solo en base a la aplicación de un insumo generalmente resulta en reducciones en la productividad del mismo. Entonces, para mejorar la producción y la productividad a la vez se necesitan “saltos de curva” en la relación entre el rendimiento del cultivo y la disponibilidad de insumo (Figura 47).

Las tecnologías de procesos y conocimientos en sinergia con las tecnologías duras pueden resultar en dichos saltos de curva y

conducir entonces i) a la reducción en el uso de insumos sin mermas o con aumentos de rendimiento (A y entre A y B en Figura 47), ii) al aumento de la producción manteniendo los niveles de uso de insumos (B en Figura 47) y, cuando sea necesario, iii) a incrementos en la aplicación de insumos aumentando su productividad (entre B y C en Figura 47). La disminución en el uso de insumos o la mayor captura manteniendo cantidad aplicada conllevan menores riesgos de contaminación ambiental, y las mayores productividades reducen las huellas por unidad producida. Con mayores cantidades aplicadas, la mayor productividad de los insumos no garantiza por sí misma menor contaminación, meta que sí se puede lograr a través de buenas prácticas de aplicación.

Figura 47: Relación entre rendimiento en grano y nivel de disponibilidad de un insumo para dos niveles tecnológicos: nivel actual y conjunto de tecnologías que resultan en un “salto de curva”. La productividad del insumo está representada por las pendientes de las líneas punteadas. Las rectas y letras delimitan respuestas con menor, igual o mayor utilización de insumos. El origen del eje Y es el rendimiento obtenido sin aplicación de insumos.



Un análisis de este tipo, aunque con las diferencias lógicas, también se puede realizar para los factores de producción, para los recursos como el agua de precipitaciones, la fertilidad del suelo, la radiación solar, y para otros insumos como agua de riego, plaguicidas o de energía fósil (Grassini y Cassman, 2012; Lema, 2017). En algunos casos es necesario contemplar de manera conjunta los recursos y los insumos, como por ejemplo para el análisis de la productividad del agua y de los nutrientes disponibles para un cultivo.

En síntesis, la integración de tecnologías (de conocimientos y procesos y duras) a través del rediseño de los sistemas productivos pueden resultar en “saltos de curva” en la relación entre el rendimiento del cultivo y el nivel de insumos y recursos disponibles que se traducen en i) mejor adaptación de los cultivos a ambientes actuales y futuros (cambio climático), ii) mejoras en la productividad (captura y eficiencia de uso) de recursos e insumos, y/o iii) disminuciones de la contaminación y degradación ambiental

por reducir uso de insumos o incrementar captura de insumos y recursos. Dichos saltos de curva se pueden producir ya sea por cerrar brechas con tecnologías conocidas, o por definir nuevos potenciales. Finalmente, cambios en la relación entre ganancia marginal y costo marginal pueden llevar a requerir de marcos regulatorios para evitar incrementos en uso de insumos (Hamant, 2020), según los objetivos de intensificación sostenible fijados.

Si pudimos afrontar y solucionar los problemas y desafíos que nos presentaban las regiones que exploramos en el pasado, si aprendimos a cultivar la tierra y a domesticar los animales, si protagonizamos revoluciones en la producción basadas en tecnologías novedosas, entonces somos capaces de alcanzar estos nuevos objetivos de sostenibilidad productiva. Nuestra notable capacidad de innovación nos brinda la posibilidad de generar tecnologías para satisfacer las demandas de productos agrícolas y paralelamente reducir el impacto ambiental.

Entre las estrategias y tecnologías que pueden producir los mencionados saltos de curva en el uso de recursos e insumos y reducir el impacto ambiental (intensificación sostenible), se analizan a continuación el mejoramiento genético, la biotecnología, el manejo de cultivos con bases ecofisiológicas, el manejo integrado de organismos perjudiciales, las buenas prácticas de aplicación de fertilizantes, las buenas prácticas en producción animal, las prácticas que conducen al uso eficiente del agua azul y verde, el incremento del número de cultivos por año y las producciones ecológicas. A estas se suman las prácticas de manejo del suelo que fueron discutidas en la Sección 5.2.1. Estas estrategias y tecnologías se enmarcan en el concepto de intensificación sostenible.

No es la intención cubrir ampliamente en esta sección los distintos temas relacionados con la intensificación sostenible, sino mencionar solo algunos ejemplos relevantes, la mayoría producto de trabajos de investigación desarrollados en la Unidad Integrada Balcarce. Los ejemplos están concentrados en el cultivo de maíz, que es el que mayor incremento de demanda mostrará en las próximas décadas y sobre el cual se han realizado fecundas investigaciones en la mencionada Unidad.

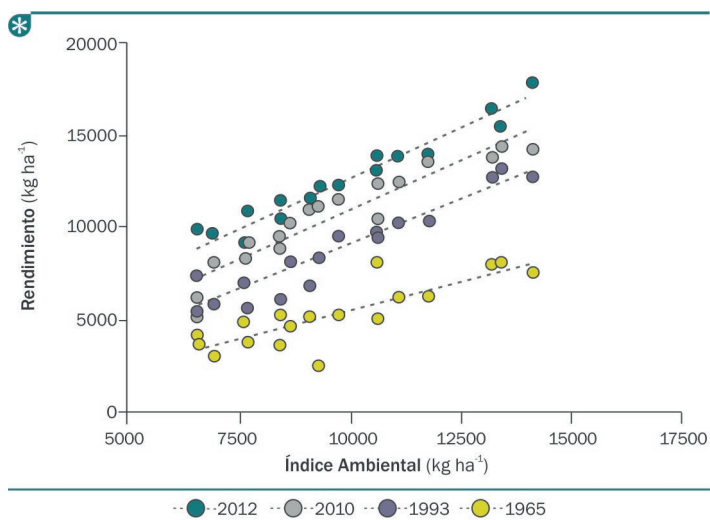
Mejoramiento genético

El mejoramiento genético vegetal, basado en la genética, pero cada vez más en aproximaciones multidisciplinarias, satisface la necesidad continua de nuevos cultivares de mejor producción en cantidad y calidad, más adaptados al clima de cada región, más tolerantes a adversidades bióticas y abióticas, y más resilientes frente a la creciente variabilidad climática (Allard, 1999; Acquaah, 2007; Acquaah, 2012).

El mejoramiento genético incrementó los rendimientos potenciales de los cultivos en las últimas décadas del siglo pasado y en el presente siglo, con tasas promedio de 1,1; 0,8; 0,6; 0,7 y 2 % anual para maíz, arroz, soja, trigo y remolacha azucarera, respectivamente (Fischer y Edmeades, 2010; Fischer *et al.*, 2014). Los rendimientos en ambientes menos productivos han aumentado con tasas similares e incluso mayores. Por lo tanto, es común encontrar cultivares que combinan alta potencialidad y alta estabilidad de rendimiento (De Santa Eduvigés, 2010; Tester y Landgridge, 2010; Di Matteo *et al.*, 2016). Estos logros se debieron principalmente al mejoramiento genético, aunque existe una interacción con el manejo de los cultivos.

En Argentina, los híbridos modernos de maíz superan a los más antiguos tanto en ambientes de alta producción como en los de limitada disponibilidad de recursos (Di Matteo *et al.*, 2016; Figura 48), lo que implica una adaptación de los cultivos a un amplio rango de ambientes. Asociado con esto, los nuevos híbridos presentan mayor eficiencia de uso de nitrógeno y de agua en comparación con los más antiguos (Robles *et al.*, 2011; Ferrreyra, 2015; Nagore *et al.*, 2017; Otegui *et al.*, 2020) y mayor producción por unidad de energía utilizada y de plaguicida aplicado. Algunos híbridos modernos obtenidos por mejoramiento convencional se destacan por su alta tolerancia al estrés (Figura 49) (Castro, 2013, De Santa Eduvigés, 2010). Por lo tanto, el mejoramiento genético de maíz en las últimas décadas ha contribuido a elevar los rendimientos potenciales, pero también aquellos alcanzados en condiciones menos favorables (Russell, 1986; Tollenaar y Lee, 2002). La elección de estos híbridos de comportamiento superior no presentaría entonces restricciones por efectos compensatorios y variación ambiental (Sadras y Denison, 2016).

Figura 48: Rendimientos de híbridos de maíz liberados en distintas décadas en función de un índice que refleja la potencialidad del ambiente (Di Matteo *et al.*, 2016).



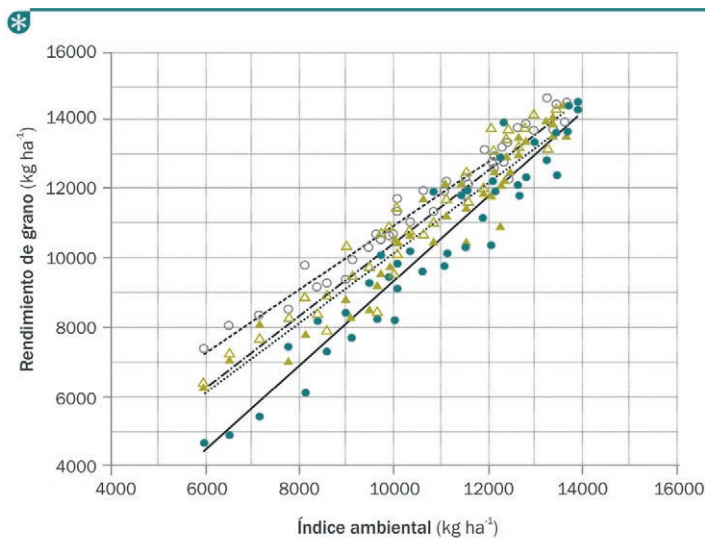


Figura 49: Rendimientos medios y ajustes lineales de 4 híbridos de maíz de estabilidad contrastante en función de un índice que refleja la productividad del ambiente (Castro, 2013).

La Figura 50 muestra la relación entre el rendimiento del cultivo de maíz y la disponibilidad de nitrógeno para híbridos liberados en distintas épocas y sembrados con su densidad de selección y adopción para alta productividad (Ferreyra, 2015). Las curvas superiores corresponden a híbridos modernos, que superan en producción y en productividad de nitrógeno a los híbridos antiguos tanto en bajo como alto nivel de nitrógeno disponible.

Las diferencias en productividad de nitrógeno se explican principalmente por mejoras en la eficiencia de uso de N absorbido (eficiencia fisiológica), variable que se asoció con un aumento en

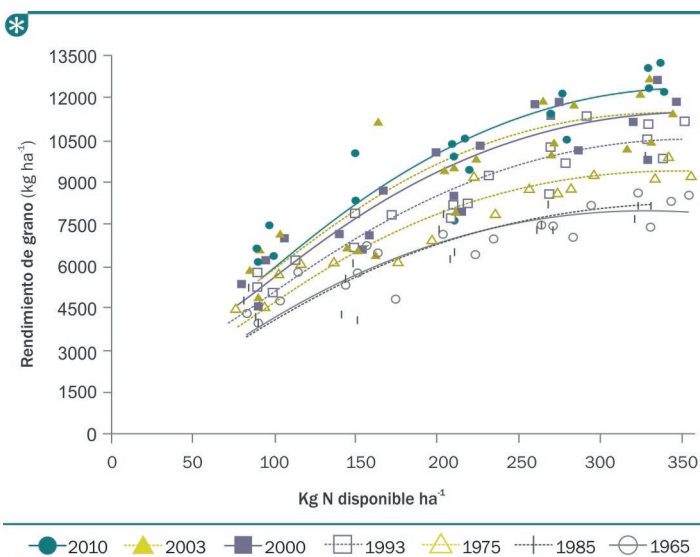


Figura 50: Relación entre rendimiento en grano y el nitrógeno disponible (incluye el del fertilizante, el presente en el suelo a la siembra y el mineralizado durante el ciclo del cultivo) para híbridos de maíz de distintas épocas sembrados con la densidad de selección y recomendación para alta producción (Ferreyra, 2015). Los años de liberación de los híbridos están indicados debajo del gráfico.

la cantidad de granos fijados por unidad de superficie y, consecuentemente, con el índice de cosecha, que es la relación entre la biomasa cosechada y la biomasa aérea total.

El mejoramiento genético de los cultivos ha aumentado la eficiencia fisiológica de N, fósforo y de nutrientes en general, principalmente a través de un mayor índice de cosecha (Ferreyra, 2015; Abbate y Andrade, 2015). La mayor eficiencia fisiológica de uso de N se asocia con caídas en el porcentaje de proteína en grano dependiendo del cambio relativo en rendimiento en grano y de la absorción de N y del índice de cosecha de nitrógeno (Sadras *et al.*, 2016).

La cantidad de N absorbido no varió mayormente entre híbridos de maíz de distintas épocas en el experimento indicado. Sin embargo, la elección del genotipo puede tener un importante efecto en la eficiencia de recuperación (N absorbido/N disponible) ya que se observa variabilidad en desarrollo y morfología de sistema radical y en capacidad de absorber y transportar nutrientes (Manske *et al.*, 2000; Fageria y Baligar, 2005; Hirel *et al.*, 2007). Por lo tanto, la eficiencia de recuperación del nutriente disponible puede ser incrementada por el mejoramiento genético.

Los híbridos modernos de maíz también presentan mayor eficiencia de uso de agua evapotranspirada o consumida que los antiguos (Nagore *et al.*, 2010; Figura 51), lo que se evidencia por un mayor índice de cosecha, asociado con una mayor fijación de granos por unidad de superficie. Contrariamente, la cantidad total de agua consumida no varió entre estos híbridos (Nagore *et al.*, 2014). Hall y Richards (2013) repasaron algunos rasgos ecofisiológicos que fueron utilizados con cierto éxito en programas de mejoramiento genético por tolerancia a sequía e indicaron rasgos promisorios para futuros progresos, entre los que se destaca la capacidad de absorción de agua por las raíces.

Una meta principal del mejoramiento genético es desarrollar cultivares adaptados a las limitaciones ambientales de cada área de producción. Además de las sequías y de las deficiencias de nutrientes, otros factores limitantes del crecimiento de los cultivos que causan pérdidas importantes de rendimiento todos los años son las temperaturas extremas, la toxicidad de aluminio, las sales, los excesos de agua por inundación, las adversidades bióticas, etc. Por lo tanto, mejorar la tolerancia a estos factores de estrés constituye un importante desafío para el mejoramiento genético, ya que contribuiría al cierre de brechas de rendimiento y al uso eficiente del agua y los nutrientes disponibles, de la energía utilizada y de los plaguicidas aplicados.

Incrementos en el rendimiento potencial condujeron a mejoras en el rendimiento bajo condiciones leves a moderadas de cualquier tipo de estrés. Esto se debería a que algunos de los principales objetivos de selección son igualmente ventajosos bajo estrés y bajo

condiciones óptimas de crecimiento (Cattivelli *et al.*, 2008). No obstante, futuros progresos bajo condiciones de alta probabilidad de estrés severo dependerán de la identificación de rasgos específicos que confieran tolerancia sin afectar el rendimiento en ausencia de estrés (Ludlow y Muchow, 1990; Schroeder *et al.*, 2013).

De los conceptos enunciados surge también la importancia del mejoramiento genético para lograr adaptación de las especies cultivadas a los efectos del cambio climático.

La identificación de rasgos relevantes asociados con el desempeño de los cultivos en sus respectivos ambientes es un gran desafío debido a i) efectos compensatorios, atenuaciones, y fuertes interacciones de los rasgos con el ambiente y entre rasgos que se producen al escalar a través de niveles de organización y ii) complejas y redundantes regulaciones de los procesos en las plantas (Chapman *et al.*, 2002; Edmeades *et al.*, 2004; Sinclair and Purcell, 2005; Passioura, 2012).

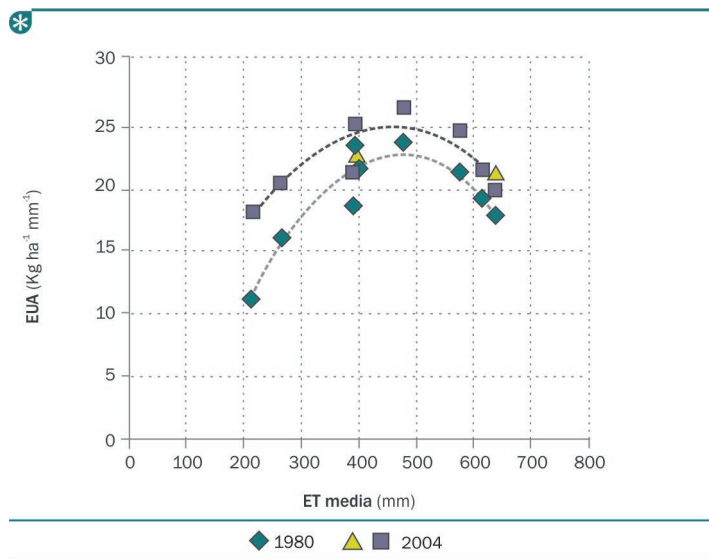


Figura 51: Relación entre la eficiencia de uso del agua evapotranspirada (EUA) y la evapotranspiración (ET) media para híbridos de maíz liberados en distintas épocas. Datos correspondientes a un híbrido liberado en 1980 (rombos) y a dos híbridos liberados en 2004 (cuadrados y triángulos). Datos de Nagore *et al.* (2010; 2017).

La Ecofisiología de Cultivos, que estudia el funcionamiento de los cultivos en interacción con el ambiente, debe contribuir con el mejoramiento genético vegetal i) caracterizando los ambientes de producción, ii) identificando los rasgos claves para rendimientos altos y estables y para una alta productividad de recursos e insumos en dichos ambientes, iii) señalando caracteres secundarios fáciles de monitorear, de alta heredabilidad y asociados con el desempeño del cultivo, y iv) entendiendo y explicando las complejas interacciones de dichos rasgos con el ambiente y con el fondo genético del cultivar (Hall y Sadras, 2009; Andrade *et al.*, 2015).

A veces se asocia al mejoramiento genético solo con incrementos de potencialidad de rendimiento y, por lo tanto, con mayores necesidades de insumos externos. Esta visión ignora los aportes de la disciplina en cuanto a la mayor estabilidad de los rendimientos y la mejora de la productividad de los insumos y recursos, aspectos altamente relevantes para una producción sostenible. La información presentada en las Figuras 48 a 51, indica que el mejoramiento genético incrementó los rendimientos, independientemente del ambiente o del nivel de insumos y de recursos disponibles.

En conclusión, el mejoramiento genético ha contribuido a aumentar el rendimiento y su estabilidad, mejorando paralelamente la productividad de los insumos y recursos disponibles.

Biotecnología

Los productos de nuestra capacidad creativa e innovadora se multiplican. Hoy estamos experimentando una prodigiosa innovación en la agricultura: la biotecnología. Esta disciplina nace cuando se descifra la constitución química del ADN (Watson y Crick, 1953).

En los últimos años hubo una explosión en la cantidad de información sobre la estructura de los genomas de las plantas. Hoy están disponibles las secuencias completas del genoma de muchas especies vegetales, incluyendo cultivos importantes como el arroz, el maíz y la papa (<http://www.genomevolution.org>) y grandes colecciones de recursos genómicos. También ha habido avances importantes en conocimientos y tecnologías en ingeniería genética, mutagénesis, marcadores moleculares, transgénesis, proteómica (estudio de estructura y función de las proteínas), metabolómica (estudio de metabolitos celulares), edición génica y en la bioinformática necesaria para integrar toda la información disponible. Estas técnicas pueden ser englobadas en lo que se conoce como biotecnología.

La biotecnología contribuye o puede contribuir a la producción agrícola en tres grandes áreas: a) la disminución del uso de agroquímicos peligrosos para el ambiente utilizando variedades que expresan tolerancia a insectos, enfermedades, o herbicidas de baja toxicidad; b) la mejora y diversificación de la calidad alimenticia de los productos agrícolas; y c) el aumento del potencial de rendimiento y su estabilidad.

El desarrollo de cultivares tolerantes o resistentes a adversidades bióticas por biotecnologías (Davis y Coleman, 1997; Sharma *et al.*, 2004; Elmore *et al.*, 2001; Creus *et al.*, 2007) mejoró los rendimientos y la rentabilidad en muchos cultivos y redujo el uso de

agroquímicos (Huang *et al.* 2002, Brookes y Barfoot, 2013). Ejemplos de estos cultivares son los maíces Bt resistentes al barrenador del tallo. A través de estas tecnologías podemos i) disminuir las pérdidas reales por adversidades bióticas en los cultivos, que hoy rondan el 30 % a nivel global y ii) reemplazar a los plaguicidas que reducen marcadamente las pérdidas potenciales por adversidades bióticas (Tabla 2; Oerke, 2006). Estos beneficios se anulan o revierten si estas tecnologías se usan inapropiadamente y no se complementan con prácticas sostenibles (Fernández *et al.*, 2019; Satorre y Andrade, 2020).

El rol de la biotecnología en la mejora de la calidad de los productos agrícolas está bien documentado en la literatura, como por ejemplo en los trabajos de Bressani (1991); Utsumi *et al.* (1997); Blechl *et al.* (1998); Al-Babili and Beyer (2005); Ohlrogge *et al.* (2004); Sun *et al.* (2006) y Bao (2019). Estos autores informan sobre el incremento en el aminoácido lisina en las proteínas del grano de maíz, el aumento de la proteína glicinina en soja, la manipulación de las subunidades de alto peso molecular en trigo (importante para la panificación), el desarrollo de arroz de alta calidad y especialmente con alta concentración de provitamina A, y la modificación del grado de saturación de los ácidos grasos en granos de oleaginosas (soja alto oleico, girasol alto oleico y alto esteárico).

Los logros de la biotecnología en cuanto a cultivares tolerantes a adversidades bióticas o con calidad de producto mejorada son una realidad debido a que estos rasgos son de herencia simple, involucran pocos genes integrados en cascadas lineales o en pequeñas redes, con baja interacción genotipo por ambiente, sin fuertes atenuaciones al trepar en la escala de complejidad y con efectos compensatorios menores (Andrade *et al.*, 2015).

Por el contrario, la contribución de la biotecnología al incremento del rendimiento potencial y a la estabilidad del rendimiento ante factores abióticos como tolerancia a sequía, golpes de calor, salinidad y acidez del suelo, heladas y frío ha sido menos evidente (Passioura, 2012; Edmeades, 2013; Denison, 2012, Deikman *et al.*, 2012) por ser caracteres de mayor complejidad y con fuertes interacciones entre sí y con el ambiente (Andrade *et al.*, 2015; Sadrás *et al.*, 2020).

La interacción del mejoramiento genético, la biotecnología y la ecofisiología de cultivos puede ser vital para alcanzar mayores logros en cuanto al mejoramiento de los cultivos (Pontaroli, 2013).

Como ejemplo, Edmeades (2013) concluye que las tasas de incremento de rendimiento en condiciones de sequía pueden elevarse por medio de selección asistida por marcadores moleculares y por el uso de materiales transgénicos. Para la situación analizada

por dicho autor y partiendo de una base de 3 t/ha de rendimiento de maíz bajo sequía, se pueden esperar en las próximas 2 décadas ganancias de 1,4 % por año por mejoramiento convencional, 0,6 % por año adicional por mejoramiento asistido por marcadores moleculares y 0,7 % adicional por transgénicos. En total, 2,7 % por año para esta situación específica. Estos valores de ganancia genética por tolerancia a estrés pueden ser aumentados con la combinación de técnicas como doble haploides, análisis molecular de porciones de semillas, selección genómica, apilamiento de genes de tolerancia a sequía, adecuadas localidades de testeo de tolerancia a estrés, eficiente y preciso fenotipado (Edmeades, 2013). Fischer *et al.* (2014) concuerdan con que las herramientas moleculares pueden acelerar la mejora genética; no obstante, opinan que los progresos mayores a 1 % anual son improbables.

A más largo plazo, la biotecnología puede hacer aportes disruptivos como la fijación biológica de nitrógeno en gramíneas y la reducción de la fotorrespiración en plantas C_3 .

Si bien surgen dudas sobre los beneficios del uso de la ingeniería genética en los cultivos y se indican riesgos para la salud humana y animal o para el ambiente relacionados con toxicidad, alergenicidad, flujo de genes, efectos perjudiciales sobre organismos benéficos y desarrollo de resistencias en plagas y patógenos, estos pueden y deben ser detectados, evaluados y minimizados a través de procesos de investigación y transferencia de conocimiento (Raimondi *et al.*, 2002).

En cuanto a consumir alimentos con productos vegetales transgénicos, la comunidad científica coincide ampliamente hace décadas en que no existe riesgo; sin embargo, el temor en la sociedad ha persistido (Fernández *et al.*, 2019). Se argumenta además que los transgénicos son antinaturales por introducir en los cultivos genes de otras especies. Esta crítica, no obstante, no se aplicaría a productos logrados con la nueva tecnología denominada edición génica por la cual se logran mutaciones dirigidas en el genoma de los organismos (Mao *et al.*, 2019; Fernández *et al.*, 2019).

Manejo de cultivos con base ecofisiológica

Aumentar la producción haciendo un uso más eficiente de los recursos e insumos disponibles puede también lograrse por medio del manejo de cultivos basado en el conocimiento de los factores que interactúan en la determinación del rendimiento. Dicho manejo, que generalmente presenta interacciones positivas con el mejoramiento genético, se sustenta en identificar prácticas que permiten adecuar los cultivos a la oferta edafoclimática y otorgarles resiliencia frente a la creciente variabilidad climática.

Estas tecnologías de procesos basadas en conocimiento, que pueden tener grandes efectos en la productividad, son, sin embargo, generalmente soslayadas en la literatura.

La productividad del agua del cultivo de maíz, medida como la relación entre el rendimiento y la cantidad de precipitaciones en un periodo de 50 días alrededor de la floración, aumentó a lo largo de las últimas décadas en establecimientos CREA del sur de la provincia de Buenos Aires (Figura 52) (Calviño *et al.*, 2003). Este significativo salto en la productividad del agua, si bien en parte se dio por la utilización de tecnologías de insumos como fertilización con P y N y aplicación de herbicidas, se debió también, en gran medida, al uso de tecnologías de procesos y de conocimientos entre las que sobresalen la siembra directa, que mejora el balance hídrico por reducir evaporación del suelo y mejorar la infiltración, la adecuación de la fertilización a la demanda del cultivo, la elección de híbridos con mayor potencial y estabilidad de rendimiento, el ajuste de la densidad de plantas y de la fecha de siembra a las condiciones ambientales específicas, la implementación de la agricultura por ambiente, etc. Estas prácticas se encuadran en la mejora del manejo del cultivo, del agua de las precipitaciones y de los nutrientes por medio de tecnologías basadas en conocimientos, entre los que se destaca la ecofisiología de cultivos.

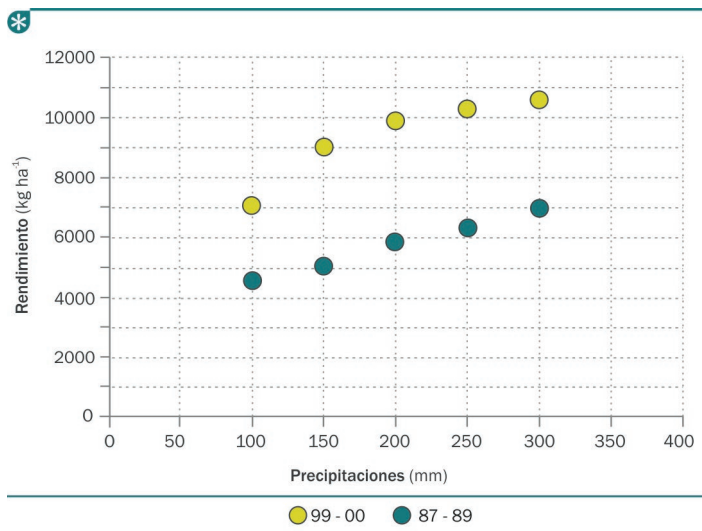


Figura 52: Relación entre el rendimiento de maíz y las precipitaciones en un periodo de 50 días alrededor de la floración para establecimientos CREA del sur de la provincia de Buenos Aires en dos campañas separadas por 12 años. Los datos fueron obtenidos a partir de las ecuaciones presentadas en Calviño *et al.* (2003).

La ecofisiología de cultivos comprende el estudio de los procesos y mecanismos determinantes del crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en interacción con el ambiente. Estos conceptos son críticos para diseñar estrategias de manejo inten-

sivas en conocimiento con el fin de aumentar la producción y la productividad de los recursos e insumos. La disciplina incluye el estudio de la partición de los productos de la fotosíntesis entre los distintos destinos metabólicos, la identificación y caracterización de los momentos más críticos para la determinación del rendimiento en cada especie cultivada, la relación entre la fuente de asimilados y la demanda de los granos durante el periodo de llenado, entre otros conceptos (Andrade y Sadras, 2002a; Andrade *et al.*, 2005; Andrade *et al.*, 2010, Andrade, 2012; Otegui *et al.*, 2020). También aborda el estudio de las relaciones hídricas en el sistema suelo-planta-atmósfera, la dinámica de los nutrientes en las plantas y los efectos de las deficiencias nutricionales e hídricas en el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Uhart y Andrade, 1995; Della Maggiora *et al.*, 2002; Andrade y Sadras, 2002b; Andrade *et al.*, 2002a; Otegui *et al.*, 2020).

Además, los conocimientos ecofisiológicos constituyen las bases para el estudio de los efectos del genotipo, el ambiente y el manejo del cultivo sobre la composición y calidad del producto primario (Andrade y Ferreiro, 1996; Aguirrezábal y Andrade, 1998; Dosio *et al.*, 2000; Izquierdo *et al.*, 2002; Aguirrezábal *et al.*, 2009; Izquierdo *et al.*, 2009; Cirilo *et al.*, 2011; Martre *et al.*, 2011).

Para orientar el manejo de los cultivos, es fundamental la identificación de los periodos críticos para la determinación del número de granos y del rendimiento. Estos son la floración en maíz y girasol, la prefloración en trigo, y etapas reproductivas más avanzadas en soja (Fischer, 1985, Cantagallo *et al.*, 1997; Uhart y Andrade, 1991; Andrade *et al.*, 1999; Egli y Bruening, 2005; Monzon *et al.*, 2020). El objetivo es que los cultivos alcancen un estado fisiológico óptimo en dichas etapas (Andrade *et al.*, 2005) caracterizado por altas tasas de crecimiento, prolongadas duraciones y altas particiones de biomasa a estructuras reproductivas. Para lograrlo se ajustaron la fecha de siembra, el ciclo del cultivar, la densidad de plantas, el espaciamiento entre hileras y el manejo del agua y los nutrientes en varios sistemas de producción, lo que permitió aumentar los rendimientos, la rentabilidad, las eficiencias de uso de agua y de nutrientes disponibles, y la eficiencia de uso de la energía fósil consumida (Cirilo y Andrade, 1994; Sarlangue *et al.*, 2007; Andrade *et al.*, 2002b; Andrade y Abbate, 2005).

A continuación se presentan algunos ejemplos de manejo de cultivos basado en conocimientos ecofisiológicos. Más detalles sobre estos conocimientos se pueden consultar en Andrade y Sadras, (2002a); Andrade *et al.* (2010); Maddonni (2012); Cerrudo *et al.* (2013); Mercau y Otegui (2015); y Otegui *et al.*, (2020).

El manejo del cultivo de maíz se debe ajustar en función del ambiente lo que puede resultar en prácticas recomendables opuestas según la disponibilidad de agua (Figuras 53 y 54). En zonas con alta probabilidad de ocurrencia de sequía en los meses de verano se recomienda i) atrasar la fecha de siembra para reducir la probabilidad de ocurrencia de deficiencias hídricas en el periodo crítico de floración y ii) bajar la densidad de plantas para incrementar los recursos disponibles por individuo en esa etapa y aliviar así el estrés y el relegamiento que en esta especie sufren las espigas en ambientes restrictivos. La disponibilidad de agua por individuo mejora por diferimiento del recurso de etapas vegetativas a reproductivas y por reducirse la competencia entre plantas. Por el contrario, en zonas con alta disponibilidad de agua (suelos profundos bien barbechados, presencia de napa, o bajo riego), la recomendación es i) sembrar temprano para aprovechar mejor el potencial del ambiente y que el periodo crítico de floración ocurra con mayores radiaciones incidentes y ii) aumentar la densidad de plantas para evitar o reducir posibles limitaciones morfogénicas que restringen la capacidad de los destinos reproductivos (número de granos) durante el llenado de granos. Estas recomendaciones opuestas para las dos situaciones ambientales planteadas surgen del entendimiento del funcionamiento del cultivo en interacción con el ambiente. En relación con este punto, es de destacar que en los últimos años el mejoramiento genético ha reducido el mencionado relegamiento de la espiga en floración y ha incrementado la plasticidad reproductiva de las plantas (Di Matteo *et al.*, 2016).

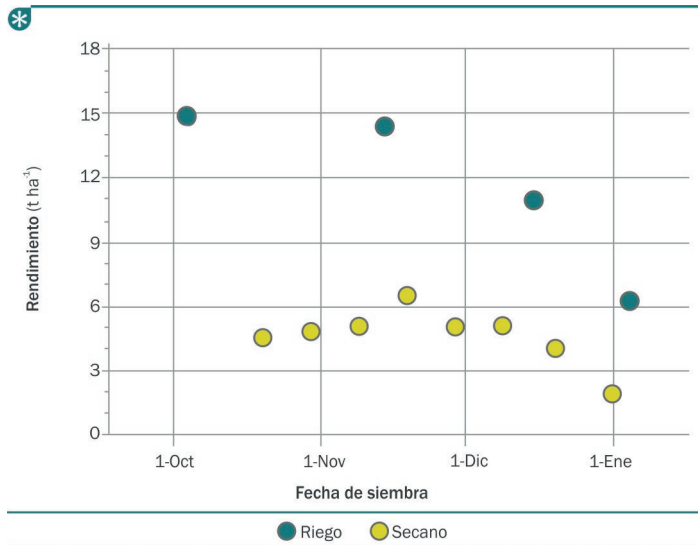
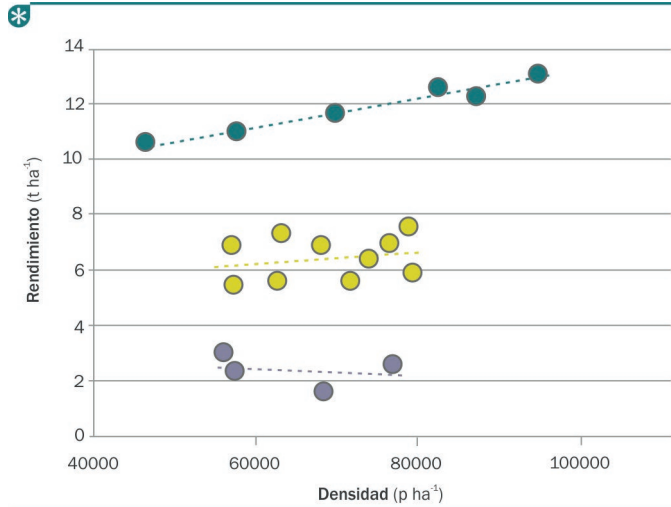


Figura 53: Rendimiento de maíz (híbrido DK 692) en función de la fecha de siembra para dos condiciones hídricas i) Balcarce sin limitaciones hídricas (círculos; 500 mm de pp más riego, suelo profundo) y ii) Coronel Suárez sin riego (cuadrados; déficits de alrededor de 300 mm entre precipitación y evapotranspiración potencial durante el ciclo del cultivo temprano y suelo de 90 cm de profundidad efectiva). Promedio para 4 campañas (Cerrudo *et al.*, 2013; Bonelli, 2014). En Cnel. Suárez, además, el retraso de la fecha de siembra hasta fines de noviembre reduce la variabilidad interanual de los rendimientos.



Figura 54: Rendimiento de maíz en función de la densidad de plantas para tres ambientes que difieren en el nivel de restricción hídrica alrededor de floración: i) restricción severa (línea inferior), restricción media y restricción leve (línea superior). Adaptado de Andrade *et al.* (1996).



Los principios ecofisiológicos fueron además de utilidad para adecuar las rotaciones y el manejo del cultivo al ambiente definido por la topografía en establecimientos del SE de la provincia de Buenos Aires (Calviño, com. personal; Monzon *et al.*, 2018). En primer lugar, se realizó una caracterización ambiental en función de la topografía. Las lomas presentan un mayor periodo libre de heladas y poseen suelos someros con alta probabilidad de ocurrencia de deficiencias hídricas en verano. Por el contrario, los bajos presentan un mayor riesgo de heladas y mayor disponibilidad de agua (incluso lotes con presencia de napa).

A partir de esta información se diseñaron potreros con características uniformes. Luego, en función del conocimiento de cada ambiente y del funcionamiento de los cultivos, se determinó la secuencia de especies de la rotación de cada potrero y el manejo apropiado de cada cultivo. Ejemplos de estas prácticas son i) la eliminación del cultivo de maíz de las lomas por su alta susceptibilidad a sequía en floración, ii) bajar la densidad de plantas y retrasar la fecha de siembra en maíz, tal como fuera recomendado para áreas con alta probabilidad de ocurrencia de estrés hídrico en verano, en caso de decidir mantener este cultivo en dichos ambientes, iii) la restricción del doble cultivo trigo-soja a las lomas en las que el mayor periodo libre de heladas permite dicha práctica, iv) la utilización de soja de ciclo más corto en los bajos para adecuarse al menor periodo libre de heladas y aprovechar el alto potencial del ambiente, realizando de ser necesarios los ajustes de densidad y espaciamiento entre hileras para asegurar altas coberturas vegetales, v) la anticipación de la floración del trigo en las lomas en las cuales el riesgo de heladas en esa etapa es menor, lo que resulta en mayor potencial y estabilidad del rendimiento

y posibilita la deseable anticipación de la siembra de soja de segunda, etc. Estos ajustes innovadores en función del ambiente resultaron en notables incrementos de la productividad por ha del establecimiento (20 %), y de las productividades del agua, de los nutrientes disponibles, y de la energía fósil utilizada.

La agricultura de precisión también puede contribuir a mejorar la producción, la productividad de los recursos e insumos disponibles, y la calidad del ambiente a través del ajuste de la fertilización, del riego, de la densidad de plantas, y de otras prácticas a las condiciones particulares de cada microambiente del potrero (Stafford, 2005; Gebbers y Adamchuk, 2010; Rosegrant *et al.*, 2014). Esta técnica requiere también de los conceptos de la ecofisiología y es facilitada por los nuevos desarrollos en satélites, sensores, robotización, automatismo de maquinaria agrícola, sistemas de información geográfica, procesamiento de la información y sistemas de comunicación.

Buenas prácticas en el uso de agua y fertilizantes

En los párrafos siguientes se presentan ejemplos adicionales de mejora en la productividad del agua y de los nutrientes mediante tecnologías basadas en conocimientos ecofisiológicos y buenas prácticas agrícolas.

El agua verde, o sea la de las precipitaciones, constituye el principal recurso hídrico para la producción agrícola y es en general el principal factor limitante para el crecimiento de los cultivos (Andrade y Sadras, 2002b). Por lo tanto, es importante prestar atención a la productividad del agua en la agricultura de secano. La productividad del agua verde es el producto de la eficiencia de captura y la de uso de agua evapotranspirada (Caviglia *et al.*, 2004; Hsiao *et al.*, 2007; Andrade y Caviglia, 2015). La eficiencia de captura es la relación entre el agua consumida (evapotranspirada) por el cultivo y la precipitación anual. La cantidad de agua de las precipitaciones anuales que es capturada o evapotranspirada por los cultivos simples es generalmente inferior al 50 % (Caviglia *et al.*, 2004; Wallace, 2000). La eficiencia de uso de agua evapotranspirada se calcula como la relación entre el rendimiento en grano y el agua evapotranspirada. Es sumamente variable (Hsiao *et al.*, 2007) pero toma usualmente valores entre 7 y 20 kg ha⁻¹ mm⁻¹ según cultivo, ambiente y manejo (Della Maggiora *et al.*, 2002; Caviglia *et al.*, 2004; Nagore *et al.*, 2010; Nagore *et al.*, 2017). Ambas variables son relevantes en la determinación de la productividad del agua verde.

La eficiencia de captura de agua depende principalmente de la proporción del tiempo que el suelo está bajo cobertura vegetal. Por lo tanto, alargar el ciclo del cultivar y aumentar el número

de cultivos por año mejoran la captura de la precipitación anual. Esta también puede ser mejorada por reducir las pérdidas de este recurso por escurrimiento superficial y por aumentar el agua disponible en el suelo a través de prácticas de manejo como el barbecho, las labranzas conservacionistas y otras técnicas de captura de agua (Fereres y González Dugo, 2009; Rost *et al.*, 2009). Mejorar la eficiencia de captura de agua disminuye excesos hídricos y, por lo tanto, los riesgos de erosión, inundación, salinización y contaminación de cursos de agua y de napas.

La eficiencia de uso del agua consumida se puede mejorar aumentando la relación entre agua transpirada y evaporada (Fereres y González Dugo, 2009) y por ubicar a los cultivos en periodos o áreas de menores déficits de presión de vapor (menores demandas hídricas) (Abbate *et al.*, 2004).

Rost *et al.* (2009) estimaron aumentos de 19 % en la producción de cultivos por reducir 25 % la evaporación y por recolectar y utilizar un 25 % de las pérdidas por escurrimiento.

La eliminación o solución de otros factores limitantes como deficiencias nutricionales, adversidades bióticas, temperaturas no óptimas, o inadecuadas prácticas de manejo del cultivo, resulta en mayores rendimientos y en mejoras de la eficiencia de uso de agua consumida (Correndo *et al.*, 2012; Hernández *et al.*, 2015).

En cultivos regados es necesario aumentar la eficiencia del riego que es en general muy baja (Wallace y Gregory, 2002). Esto se puede lograr reduciendo pérdidas y logrando un uso más eficiente del agua absorbida por el cultivo, lo que involucra conocimientos en hidrología, ingeniería, edafología y ecofisiología, entre otras disciplinas (Hsiao *et al.*, 2007).

La productividad del agua de riego es el resultado de una serie de factores multiplicativos. Estos son la eficiencia de i) conducción y distribución del agua de la fuente al lote, ii) de aplicación, que es la relación entre el agua disponible en el suelo para los cultivos y el agua que llega al lote, iii) de captura, que es la relación entre el agua evapotranspirada por el cultivo y la disponible en el suelo y iv) de uso del agua evapotranspirada, que es la relación entre la producción de biomasa o rendimiento de producto comercial y el agua evapotranspirada (Hsiao *et al.*, 2007). La eficiencia general del manejo del riego de los sistemas colectivos (que incluye la de conducción, distribución y aplicación) se sitúa en el rango de 35 a 40 % (Prieto, 2017).

La productividad de un nutriente es el producto de la eficiencia de recuperación del nutriente disponible y la de uso del nutriente absorbido (Andrade, 2009). Como ya fuera indicado en el capítulo de impacto ambiental, la eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado es baja (Lassaleta *et al.*, 2014; Zhang *et al.*,

2015; Cui *et al.*, 2018), lo que indica un alto potencial de contaminación por pérdidas de este nutriente al ambiente. En algunos países como China, el nivel de fertilización y de contaminación es muy alto, y en otros como Argentina, los niveles de reposición de los nutrientes extraídos del suelo por los cultivos son bajos, lo que resulta en caídas de materia orgánica y fertilidad de los suelos (Sainz Rozas *et al.*, 2011; Cui *et al.*, 2018).

Mejorar la eficiencia de recuperación de los fertilizantes aplicados tiene fuertes implicancias con relación al objetivo de disminuir el uso de estos insumos y la contaminación que producen. Una mayor recuperación de nutrientes se puede lograr a través del manejo del cultivo y del fertilizante (Cassman *et al.*, 2003; Doberman, 2007; Andrade, 2009; Echeverría y García, 2015).

El manejo responsable de los fertilizantes requiere de la aplicación de la fuente correcta, a la dosis adecuada, en el momento adecuado y en el lugar correcto (IPNI, 2012; UNEP, 2014). La eficiencia de recuperación tiende a disminuir con el incremento en la disponibilidad del nutriente y cuanto mayor es la oferta en relación con la demanda del cultivo (Cassman *et al.*, 2002; Barbieri *et al.*, 2008). De aquí surge la importancia de los análisis de suelo y planta para evaluar la disponibilidad de nutrientes y los requerimientos de fertilizante.

Una mayor sincronía entre los requerimientos por parte del cultivo y la oferta resulta en una menor exposición del N a los mecanismos de pérdidas y, por lo tanto, en una mayor recuperación. En este sentido, la aplicación del fertilizante en el estadio de 6 hojas expandidas del maíz y en el macollaje del trigo mejoró la eficiencia de recuperación de nitrógeno en comparación con la fertilización en el momento de la siembra (Sainz Rozas *et al.*, 1997; Melaj *et al.*, 2003). El fraccionamiento de la dosis, la localización, la fuente de fertilizante nitrogenado, la aplicación de fertilizantes con el riego y la utilización de fertilizantes de liberación lenta son otras prácticas que pueden resultar en una mayor eficiencia de recuperación del nutriente, aunque estos efectos interactúan fuertemente con el ambiente (Fageria y Baligar, 2005; IPNI, 2012). Prácticas de manejo del cultivo como la siembra de maíz con mayor densidad de plantas y con menor espaciado entre hileras incrementaron la eficiencia de recuperación de N (Barbieri *et al.*, 2008; Pietrobón, 2012). Esto se debería principalmente a una más rápida y mayor exploración del suelo por las raíces con este sistema de cultivo.

Similarmente a lo mencionado para agua, la eliminación o solución de otros factores limitantes para el crecimiento como deficiencias hídricas y de otros nutrientes, temperaturas no óptimas, adversidades bióticas e inadecuadas prácticas de manejo del cultivo y del suelo, puede aumentar la eficiencia de uso del nutriente absorbido.

Una mayor precisión en los pronósticos climáticos, el diagnóstico de la fertilidad de los suelos, la estimación del agua disponible en el momento de la siembra, el monitoreo del estado de las plantas y del ambiente a lo largo de la estación de crecimiento y la evaluación de las condiciones particulares de cada microambiente del potrero posibilitará ajustes del manejo del cultivo, de la fertilización, del riego y de otras prácticas con vistas a una mayor producción y a un uso más eficiente de los recursos e insumos.

Finalmente, saltos de curva en la relación entre producción y nivel de uso de fertilizantes de síntesis química también pueden y deben lograrse mediante técnicas sostenibles como la fijación biológica de nitrógeno (Postgate, 1998), la utilización de micorrizas (Cano, 2011), la recirculación de nutrientes en sistemas pastoriles (Sección 5.2.1) y la recuperación y reciclaje de nutrientes desde la producción animal intensiva, la industria agroalimentaria y las áreas urbanas hacia los campos cultivados (Sharma *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019, Eid *et al.*, 2019). Como ejemplo de estas últimas prácticas, anualmente se aplican a los suelos agrícolas del mundo alrededor de 25 millones de t de N de estiércol animal (Zhang *et al.*, 2017, FAO, 2020) con grandes diferencias entre sistemas de producción. El potencial de reciclaje de nutrientes es alto (Rocks-tröm *et al.*, 2009a; Sharma *et al.*, 2017; Powers *et al.*, 2019; Tonini *et al.*, 2019; FAO, 2020). El elevado costo y la dificultad de acondicionamiento, distribución y aplicación, y la presencia de contaminantes, limitan actualmente el uso de las mencionadas fuentes de residuos orgánicos.

Síntesis sobre manejo con bases ecofisiológicas

En síntesis, prácticas de manejo de cultivos intensivas en conocimiento pueden aportar significativamente i) al aumento de la producción a través de la adaptación de las especies cultivadas a las condiciones específicas del ambiente y al cambio climático, y ii) al uso eficiente de los recursos e insumos que resulte en una menor dependencia relativa, e incluso en menores valores absolutos, de insumos no renovables o contaminantes. Además, se pueden producir fuertes sinergias de dichas prácticas entre sí y con el mejoramiento genético vegetal.

Los aportes de estas prácticas basadas en procesos y conocimientos a la producción son frecuentemente soslayados en la discusión sobre la futura seguridad alimentaria. No obstante, los datos presentados en el presente capítulo dan una idea de la magnitud de las contribuciones de estas estrategias innovadoras.

En un nivel superior de análisis, ya tres décadas atrás, Loomis y Connors (1992) alentaban a los investigadores a reforzar y utilizar los conceptos de la ecología de cultivos para solucionar el conflic-

to entre producción y sostenibilidad a través del adecuado manejo de los sistemas agrícolas.

Buenas prácticas en producción animal

El mejoramiento genético, la biotecnología, la sanidad, la nutrición y las técnicas reproductivas son las vías para aumentar la producción animal y la productividad de recursos e insumos y para obtener productos sanos y de calidad. En cuanto a la producción sostenible de pasturas cultivadas y cultivos destinados a la alimentación animal, son válidos los factores y buenas prácticas indicadas en puntos anteriores para la producción agrícola (Agnusdei, 2013). Las demandas de estos productos vegetales para alimentación animal pueden variar en función de la eficiencia de conversión de grano a carne, leche y huevos y del volumen de producción animal sobre tierras no cultivables, entre otras variables. Las buenas prácticas en producción animal deben orientarse a reducir los impactos negativos de la actividad como el sobrepastoreo, la contaminación en producciones intensivas, las emisiones de gases de efecto invernadero, y el riesgo para la salud por la utilización de productos químicos, entre otros.

Para evitar tanto los efectos del sobrepastoreo como la erosión (hídrica y eólica) y la desertización al quedar el suelo descubierto, y lograr una producción sostenida en cantidad y calidad de forraje de pastizales naturales, es necesario conocer y analizar la oferta forrajera, los requerimientos de los animales, los factores que afectan el consumo, los efectos de la carga animal y del sistema de pastoreo, y la necesidad de tiempos de descanso (Borrelli, 2001).

La estrategia para minimizar los problemas de deterioro ambiental derivados de planteos intensivos de producción animal consiste en la elección de la región y del sitio con condiciones adecuadas en cuanto a características hidrológicas, topográficas, económicas y demográficas (Pordomingo, 2003). También deben considerarse la textura del suelo, las pendientes y la profundidad de la napa freática para definir el diseño de los corrales, los tratamientos de pisos y las estructuras de recolección de efluentes y estiércol. El objetivo es maximizar la captura y el procesamiento de estos residuos (Pordomingo, 2003). La recuperación y el reciclaje de nutrientes y energía a partir del estiércol de vacas lecheras, de animales estabulados o en feedlot, o a partir de cama de pollo (Bouwman *et al.*, 2011), aunque todavía poco utilizadas, son estrategias claves para aumentar la productividad de los sistemas de producción animal, reducir la contaminación del aire, suelo, aguas subterráneas y superficiales, mejorar el secuestro de carbono en el suelo, y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

La disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de producto animal puede lograrse, además, por la mejora de la calidad y digestibilidad del alimento en los rumiantes, y por el manejo, la genética y la salud animal, tanto en rumiantes como en monogástricos (Andeweg y Reisinger, 2016; Posse, 2017).

En las últimas décadas se ha incrementado el uso de sustancias que permiten mejorar la asimilación de los alimentos tales como antibióticos, probióticos, enzimas, modificadores del sistema inmunitario, modificadores metabólicos o agentes anabolizantes. Estos productos, sumados a otros utilizados en salud y reproducción animal (antiparasitarios, hormonas, etc.), tienen un impacto en la salud humana y animal, por lo que deben adoptarse prácticas que reduzcan su uso y efectos (Zielinski com. personal). Entre las buenas prácticas se debe incluir evitar el maltrato de los animales, principalmente por razones éticas, pero también, porque el bienestar animal influye directamente en la calidad de la carne (IPCVA, 2006).

Finalmente, la ganadería y la producción agrícola deben ser analizadas en forma conjunta, explorando las interacciones positivas entre estas actividades (Lemaire *et al.*, 2014; Pordomingo com. personal). Como había sido mencionado anteriormente, los sistemas agrícola-ganaderos presentan ventajas en comparación con los sistemas de cultivos de grano en cuanto a recuperar materia orgánica, fertilidad y propiedades de los suelos, recirculación de nutrientes, diversidad agroecológica, diversificación de la producción, control de excesos hídricos y adversidades bióticas, reducción de uso de plaguicidas, entre otras (Lemaire *et al.*, 2014). Estos beneficios se contraponen con las desventajas enunciadas de la producción animal, principalmente, las derivadas de las ineficiencias energéticas, de la contaminación puntual en sistemas intensivos y de las emisiones de GEI (Poore y Nemecek, 2018; Lancet Commissions, 2019).

Manejo integrado de plagas

La reducción en el uso de los plaguicidas en un aspecto central para alcanzar producciones más sostenibles. Tal como fuera indicado en el capítulo de impacto ambiental, los investigadores encuentran residuos de estos productos en tierra, agua, aire y alimentos (Colombo y Sarandón, 2015).

Por los riesgos que implican, es imperioso disminuir el uso de plaguicidas y utilizarlos de manera más segura y eficiente. Para esto hay que basar el control de las plagas en un manejo racional de estas y no solamente en la aplicación de plaguicidas.

La Organización Internacional de Lucha Biológica e Integrada define a la Producción Integrada como: “Un sistema agrícola de producción de alimentos que utiliza al máximo los recursos y los mecanismos de regulación naturales y asegura a largo plazo, una agricultura viable. En ella los métodos biológicos, culturales, químicos y demás técnicas son cuidadosamente elegidos y equilibrados, teniendo en cuenta el medioambiente, la rentabilidad y las exigencias sociales”. Esta forma de producir garantiza el respeto por el medio y la salud de los productores y consumidores.

A continuación se listan y describen brevemente buenas prácticas y manejos integrados de organismos perjudiciales que contribuyen a reducir la utilización de agroquímicos contaminantes y a su uso más seguro sin dañar el ambiente, los humanos, ni los organismos benéficos (Dent, 1995; Sbarbati Nudelman, 2011; Satorre, 2015). Estas incluyen controles basados en i) la elección de la fecha de siembra y el ciclo del cultivar, para que los cultivos crezcan y definan sus rendimientos cuando las adversidades bióticas estén ausentes o sean menos problemáticas, ii) las rotaciones de cultivos para cortar el ciclo de plagas y enfermedades y combatir las malezas, iii) los cultivos de cobertura o doble cultivos que demoren, reduzcan o compitan con el nacimiento de las malezas, iv) el control mecánico, v) los cultivares resistentes o tolerantes a insectos y enfermedades por mejoramiento tradicional y por biotecnologías, vi) los cultivos trampa, vii) agroquímicos menos tóxicos y persistentes, moléculas más específicas utilizadas en bajas dosis y productos derivados de sustancias naturales, viii) la utilización de enemigos naturales y el control biológico (trofismo, parasitismo, feromonas, biocontroladores de patógenos como micorrizas, trichoderma y pseudomonas), ix) la utilización de refugios, zonas riparias y corredores biológicos, x) la rotación de productos con distinto modo de acción para disminuir la aparición de especies resistentes, xi) la consideración de umbrales de daño que justifiquen tratamiento, xii) el uso eficiente y responsable de los productos, etc.

El conocimiento de la dinámica poblacional y de la estructura funcional de las plagas, de las condiciones predisponentes para su aparición y de cómo son afectadas por el sistema de producción, el manejo del cultivo y el ambiente son datos importantes para poder predecir su incidencia y determinar momentos de mayor vulnerabilidad para su control (Satorre, 2015; Satorre *et al.*, 2016). Además, el control de la adversidad biológica tendría que realizarse solo cuando el número de individuos de esta supere el umbral de daño económico. Estos umbrales dependen del estado fisiológico del cultivo y de la plaga, del ambiente y de otras variables de índole económica. Entonces, la simple presencia de una plaga no implica que deba ser controlada.

Adicionalmente, el mantenimiento de corredores biológicos, franjas con vegetación natural, bordes de caminos, zonas riparias favorecen una mayor biodiversidad (Ernoul *et al.*, 2013; Herrera *et al.*, 2017; Saleka *et al.*, 2018) y, por lo tanto, a los enemigos naturales de plagas (Tulli *et al.*, 2017).

Los principios de la ecofisiología de cultivos son críticos para diseñar estrategias de manejo intensivas en conocimiento con el fin de disminuir el uso de agroquímicos contaminantes. Estos conceptos ayudan a interpretar y analizar los daños que producen los organismos perjudiciales sobre el área foliar e intercepción de radiación, la eficiencia fotosintética, y la partición de biomasa a destinos de interés comercial (Boote *et al.*, 1983; Johnson, 1987; Savary y Willocquet, 2020) contribuyendo así al establecimiento de umbrales de daño económico.

Los umbrales de daño por reducción de área foliar durante las etapas vegetativas y las necesidades de control dependen del momento de ocurrencia y, principalmente, de la plasticidad de las plantas del cultivo y de los factores ambientales, que en conjunto determinan la capacidad de recuperación de cobertura foliar previo a los momentos críticos de determinación del rendimiento (Sadras 2002). Además, los umbrales de daño por pérdida de área foliar y de eficiencia fotosintética durante el llenado de granos son función, entre otras variables, de la relación entre la demanda de los granos en crecimiento y la capacidad fotosintética del cultivo, que a su vez son moduladas por el ambiente.

La habilidad competitiva del cultivo con las malezas depende de las prácticas culturales y del genotipo. Así, una mayor densidad de plantas, un menor espaciamiento entre hileras, fechas de siembra que aseguren rápido crecimiento y la utilización de cultivares de crecimiento vigoroso, más foliosos y de hojas más planófilas, incrementan la intercepción de radiación por parte del cultivo en etapas tempranas y, por lo tanto, su habilidad competitiva contra las malezas (Bedmar *et al.*, 2002; Mc Donald y Gill, 2009), posibilitando la reducción en el uso de herbicidas.

La proporción de producto plaguicida que llega efectivamente a destino es generalmente muy baja, por lo que existe un gran potencial para la utilización de tecnologías geoespaciales, de sensores, de información y comunicación, de robótica y técnicas de aplicación para el control localizado de malezas, que posibiliten disminuir al máximo la cantidad de producto aplicada ajustándose a las necesidades reales de cada situación (Fernández Quintanilla, 2015), logrando así importantes saltos de curva en la relación entre producción y nivel de uso de herbicidas.

La notable sinergia entre estas tecnologías novedosas permitió desarrollar robots que controlan malezas mecánicamente o con aplicaciones dirigidas al blanco de dosis mínimas del producto

específico para cada especie detectada (Calleija y Sukkarieh, 2018; Raja *et al.*, 2019). Estos conceptos pueden extenderse al control de enfermedades y plagas animales. Además, la nanotecnología ofrece nuevos productos y nuevos mecanismos de aplicación promisorios para reducir el uso de pesticidas (Sekhom, 2014).

El manejo integrado de organismos perjudiciales puede disminuir los daños de las plagas sin comprometer los rendimientos tal como indican los siguientes ejemplos.

En un lote comercial del departamento de Castellanos (provincia de Santa Fe, Argentina) se realizó un manejo integrado de plagas en soja basado en i) monitoreo semanal de plagas y de sus enemigos naturales, ii) utilización de umbrales de tratamiento, o sea que los plaguicidas se aplican solo cuando es estrictamente necesario, iii) uso de productos menos agresivos con mínimo daño a organismos benéficos y iv) técnicas de aplicación adecuadas. Con esta aproximación se realizaron solo dos aplicaciones de insecticidas en 10 años en contraste con lo usual de 3 aplicaciones por año que realizan los productores de la zona. Los rendimientos bajo este sistema de buenas prácticas agrícolas fueron similares o superiores a los de los promedios del departamento y de la provincia (Frana com. personal).

En otro caso correspondiente al cinturón hortícola de Mar del Plata, la implementación del manejo integrado de plagas en un lote de producción de tomate resultó en rendimientos similares y en una reducción del 70 % en el uso de plaguicidas respecto del manejo convencional (Leonardi *et al.*, 2015).

En Estados Unidos, se ha estimado que el uso de plaguicidas puede reducirse entre 35 y 50 % sin afectar los rendimientos y sin subir apreciablemente el precio de los alimentos (Saini, 2014). Más recientemente, Lechenet *et al.* (2017) estimaron para Francia que el uso total de pesticidas puede disminuirse 42 % sin afectar negativamente la productividad y rentabilidad en el 59 % de los establecimientos de una amplia red de estudio. Esto corresponde a reducciones de uso promedio de 37, 47 y 60 % de herbicidas, fungicidas e insecticidas, respectivamente. El potencial de reducción de uso de plaguicidas es mayor en campos con alto uso de insumos. Además, en Dinamarca, Suecia, Holanda y Ontario existen en la actualidad programas para reducir el uso de pesticidas en un 50 % (Saini, 2014). Las novedosas técnicas de aplicación al blanco mencionadas anteriormente pueden contribuir a importantes reducciones en la cantidad de producto aplicado.

Finalmente, también es necesario considerar todas aquellas prácticas relativas al uso eficiente y responsable de los productos como, tratamiento de envases, respetar periodos de carencia, transporte y almacenamiento seguros, proteger a los operarios, y utilizar técnicas para evitar derivas, entre otras.

En conclusión, técnicas intensivas en conocimientos, algunas ya existentes y otras para desarrollar, posibilitan reducir sensiblemente la aplicación de agroquímicos contaminantes en los sistemas de producción agrícola sin que esto comprometa alcanzar las metas de producción de alimentos que cubra las futuras necesidades de la población. La reducción en el uso de plaguicidas es un aspecto relevante de las producciones ecológicas.

Intensificación de la secuencia. Cultivos por año

El incremento en el número de cultivos por año constituye otra estrategia basada en procesos y conocimientos que posibilita incrementar la producción y hacer un uso más eficiente de los recursos e insumos. Según Bruinsma (2009), esta modalidad de intensificación agrícola, que no requiere aumentar la superficie bajo cultivo, puede aportar un 14 % del incremento requerido de la producción para el 2050. Datos más recientes indican que la intensificación del número de cultivos por año puede expandir el área global cosechada en 7,36 y 2,71 millones de km² (37,6 % y 13,8 % de la superficie actual) para escenarios limitados por temperatura y por temperatura y agua de precipitaciones, respectivamente (Wu *et al.*, 2018). El nivel de intensificación actual y potencial de la secuencia de cultivos para los distintos continentes se presenta en la Figura 55.

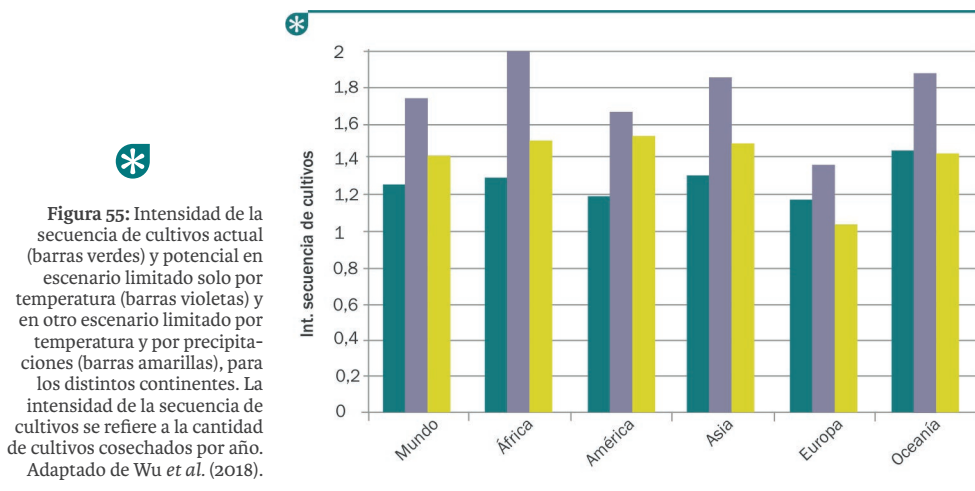


Figura 55: Intensidad de la secuencia de cultivos actual (barras verdes) y potencial en escenario limitado solo por temperatura (barras violetas) y en otro escenario limitado por temperatura y por precipitaciones (barras amarillas), para los distintos continentes. La intensidad de la secuencia de cultivos se refiere a la cantidad de cultivos cosechados por año. Adaptado de Wu *et al.* (2018).

La productividad de los cultivos con secuencia intensificada depende de las características del ambiente, especialmente el periodo libre de heladas, la temperatura y la disponibilidad de agua (Andrade y Satorre, 2015, Monzon *et al.*, 2014).

El mayor número de cultivos por año aumenta los rendimientos por unidad de tiempo y la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos del ambiente, como por ejemplo el agua y la radiación (Caviglia y Andrade, 2010). El rendimiento en grano y la productividad del agua disponible son mayores en el doble cultivo trigo/soja que en los cultivos simples (Tabla 8). Esta última variable se asocia positivamente con la eficiencia de captura (Figura 56) y no con la eficiencia de uso del agua evapotranspirada (Caviglia *et al.*, 2004).

En un estudio en el que se evaluaron distintas secuencias de cultivo (Caviglia *et al.*, 2013) se encontró, por un lado, que a mayor número de cultivos por año mayor fue la eficiencia de captura de agua, lo que resulta en una reducción del escurrimiento superficial. Por otro lado, a mayor proporción de maíz (planta C₄) en la secuencia mayor fue la eficiencia de uso del agua evapotranspirada (Tabla 8).

✱

Variable	Secuencia					
	T/S	T-S	T/S-M	T-S-M	T/S-M-S	T-S-M-S
Índice de intensificación						
	2	1	1.5	1	1.33	1
R (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	5240a	3790b	6160a	5140b	5030a	4460b
ET (mm año ⁻¹)	607a	423b	554a	453b	522a	456b
EC (mm mm ⁻¹)	0.67a	0.46b	0.60a	0.50b	0.57a	0.50b
EUA _g (gm ⁻² mm ⁻¹)	0.87a	0.92a	1.11a	1.13a	0.96a	0.97a
PA (gm ⁻² mm ⁻¹)	0.58a	0.42b	0.67a	0.56b	0.55a	0.49b

Medias seguidas por la misma letra, en cada par de secuencias, no son significativamente diferentes. Índice de intensificación es el número de cultivos por año (cociente entre el número de cultivos en la secuencia y los años que dura dicha secuencia).



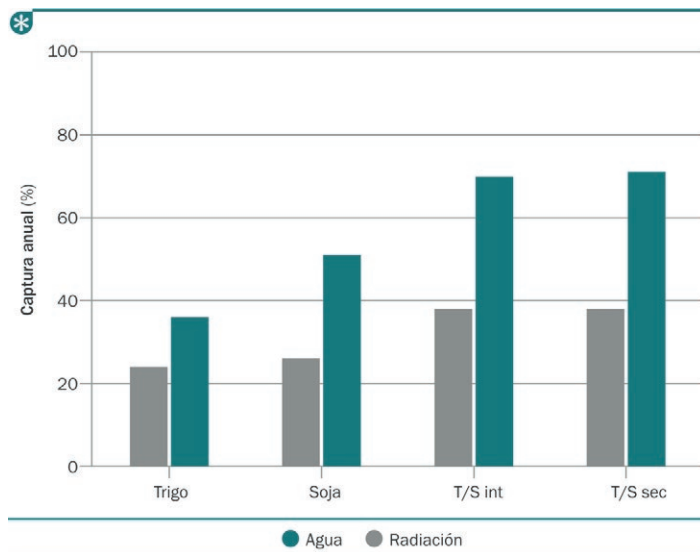
Tabla 8: Rendimiento anual (R), eficiencia de uso del agua disponible con base anual (o productividad del agua, PA) y sus componentes para distintas secuencias de cultivos que varían en el número de cultivos por año (índice de intensificación). Datos simulados utilizando una serie climática de 30 años para Balcarce Argentina. ET: evapotranspiración; EUA_g: eficiencia de uso del agua evapotranspirada para grano; PA: productividad de agua en grano; EC: eficiencia de captura del agua disponible, esta última medida como precipitación anual. T: trigo, S: soja, M: maíz, T/S: doble cultivo trigo/soja. Datos de Caviglia *et al.* (2013). La PA es la relación entre el rendimiento por año y la disponibilidad de agua con base anual.

Los recursos que no se aprovechan pueden producir procesos degradativos. Los cultivos dobles, al incrementar la captura de recursos hídricos (Figura 56) reducen los excesos que por escurrimiento superficial producen erosión y contaminación de cursos de agua, y por percolación producen elevación y contaminación de napas. Pero además, aumentan la captura de radiación (Figura 56), lo que resulta en mayores incorporaciones de carbono a los suelos que mejoran sus propiedades físicoquímicas, y la captura de nutrientes reduciendo pérdidas y contaminación (Caviglia *et al.*, 2004). Los cultivos dobles presentan ventajas adicionales en cuanto a la protección del suelo contra la erosión y el control de malezas.

Los conocimientos sobre los factores determinantes del crecimiento y rendimiento de las especies cultivadas y de las caracte-

terísticas del ambiente son útiles para evaluar las posibilidades de expansión de esta tecnología de intensificación hacia nuevas áreas, y para elevar la productividad del doble cultivo secuencial o intersembrado (Andrade *et al.*, 2012; Coll *et al.*, 2012; Andrade *et al.*, 2015; Andrade, 2016b).

Figura 56: Captura anual de radiación y de agua para los cultivos de trigo, soja, y los dobles cultivos trigo/soja intersembrados y secuenciales en Balcarce (Caviglia *et al.*, 2004). Valores expresados como porcentaje de la radiación incidente anual y de la precipitación anual.



Cosechar más de un cultivo por año es una práctica difundida en varias regiones agrícolas (Fischer *et al.*, 2014).

Por ejemplo, la soja de segunda siembra principalmente después de trigo y cebada creció rápidamente en las últimas décadas en la Argentina y hoy constituye alrededor del 30 % de la superficie total del cultivo de soja. Esta práctica estuvo favorecida por la adopción de la siembra directa y de la soja transgénica resistente al glifosato (Satorre, 2005). El doble cultivo arveja/maíz, hoy incipiente en las rotaciones de este país, es una alternativa prometedora ya que presenta importantes ventajas en cuanto a productividad, estabilidad y eficiencia de utilización de recursos (Andrade *et al.*, 2015).

Otro ejemplo de expansión del doble cultivo es el maíz de segunda (safrinha) en el Matto Grosso, Brasil, sembrado luego de la cosecha de soja. La superficie de este cultivo aumentó de 0,94 a 3,3 millones de hectáreas de 2006 a 2013, cifras que representan el 16 y 42 % de la superficie de soja de primera, respectivamente. Esta tecnología fue ampliamente favorecida por la utilización de cultivares de soja de ciclo más corto de hábito de crecimiento indeterminado.

En China, el potencial para expandir el área cosechada por aumento de la frecuencia de cultivos en la actual superficie cultivada es de 13,5 a 36,3 millones de ha sobre un total de 160 millones de ha (Yu *et al.*, 2017), dependiendo de la disponibilidad de agua. Finalmente, en Indonesia, una vez producido el cierre de brechas de rendimiento de arroz y maíz por unidad de superficie al 70-80 % del rendimiento potencial, la intensificación del número de cultivos por año puede aportar incrementos adicionales de 3 millones y 11 millones de t a la producción de arroz y maíz, respectivamente, lo que significaría un 14 % de incremento en la producción de estos dos cultivos (Agus *et al.*, 2019).

Los conceptos presentados se extienden a los cultivos de cobertura (Álvarez *et al.*, 2013; Álvarez *et al.*, 2017). Los cultivos de cobertura no están destinados a la producción de granos, sino que se suman a la rotación incrementando el índice de intensificación para proveer servicios ecosistémicos como el control de la erosión, el control de malezas, el aporte de materia orgánica, la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la captura de nutrientes, la fijación biológica de nitrógeno, el consumo de agua para evitar excesos hídricos, la descompactación del suelo, la reducción de evaporación, entre otros (Piñeiro *et al.*, 2014; Álvarez *et al.*, 2017; Agosti *et al.*, 2020). Constituyen entonces una estrategia interesante para incrementar el aprovechamiento de los recursos y para sustituir, al menos parcialmente, insumos de síntesis química. En la llanura pampeana, los cultivos de cobertura tienen importantes beneficios, y su adopción depende del balance entre estos, los costos de siembra y los posibles efectos negativos sobre el cultivo de cosecha siguiente, tales como la reducción de la disponibilidad de recursos. En este sentido, el retraso en el momento de interrupción del cultivo de cobertura generalmente favorece los servicios ecosistémicos ya indicados, pero incrementa los efectos negativos sobre el cultivo de granos siguiente. Estos efectos negativos pueden evitarse mediante decisiones de manejo tales como la especie que compone el cultivo de cobertura y el momento de interrupción de este cultivo. El uso de especies leguminosas es generalmente más favorable por mejorar la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo de cosecha siguiente (Álvarez *et al.*, 2017). Asimismo, si el cultivo de cobertura es multiespecie, puede aportar mayor diversidad y diferentes servicios en simultáneo. Las distintas especies exploran nichos ecológicos diferentes, por lo que se complementan en la exploración de los recursos pudiendo aportar mayores beneficios. Por todo lo expuesto, los conocimientos sobre el funcionamiento de estos cultivos en interacción con los cultivos de cosecha y con el ambiente son necesarios para optimizar el uso de esta práctica.

Producciones ecológicas

La agroecología es una disciplina holística y multidimensional que considera a los sistemas agrícolas como ecosistemas. Basándose en la aplicación de los principios de la ecología, busca alcanzar una producción más eficiente, diversa, y resiliente, con menor dependencia de insumos no renovables o contaminantes (Altieri, 1994; Altieri, 1999; Nicholls y Altieri, 2011; Rosegrant *et al.*, 2014). Según Gliessman (2002), la agroecología trata sobre la aplicación de conceptos y principios ecológicos para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles en el plano productivo, ambiental y social. En ese sentido, la agroecología se centra en la sostenibilidad ecológica, socioeconómica y cultural de los sistemas de producción. Nuevas acepciones amplían sus alcances a sistemas alimentarios sostenibles incluyendo desarrollos institucionales, de políticas públicas y de mercados.

La agroecología se basa en el conocimiento de las interacciones entre los componentes de los agroecosistemas y su regulación funcional para el control de adversidades bióticas (malezas, insectos y enfermedades) y el manejo de nutrientes, entre otros procesos, sirviendo así a los objetivos de producción y de cuidado ambiental. Busca mejorar la materia orgánica y la actividad y diversidad biológica de los suelos como garante de los ciclos biogeoquímicos, de otras funciones y servicios, y de la estabilidad del sistema (Wall y Bedano, 2020; Garland *et al.*, 2021). Consiste entonces en tecnologías de conocimientos y procesos para la obtención sostenible de productos agrícolas que promueven la diversidad, la eficiencia, el reciclaje, la regulación, la conservación de masa y la sinergia en los agroecosistemas.

Los sucesivos niveles innovadores hacia una producción ecológica incluyen la eficiencia de utilización de recursos e insumos, la sustitución de insumos externos no renovables o contaminantes, el rediseño de los sistemas de producción y, finalmente, la producción agroecológica en función del paisaje. En aspectos sociales se suman a los propósitos de la agroecología el desarrollo local, la equidad, la producción local de alimentos y la generación de trabajo digno.

El manejo agroecológico tiene un alto impacto potencial, pero requiere de un profundo entendimiento de las complejas interacciones presentes en los diferentes ecosistemas para mejorar su utilidad (Shennan, 2008). Las prácticas requeridas en cada caso difieren ya que son específicas del contexto (Garnett *et al.*, 2013). Por lo tanto, es necesario profundizar la investigación interdisciplinaria y colaborativa sobre dichas interacciones y sobre la adaptación de las prácticas bajo diferentes condiciones ambientales y en diferentes sistemas de producción.

La intensificación ecológica es un concepto centrado en el desarrollo de sistemas sustentables de alta producción con mínimo impacto en los ecosistemas, que pone énfasis en procesos y principios ecológicos (Tittonell, 2018; Kleijn *et al.*, 2019; Garibaldi *et al.*, 2019). Busca combinar conocimientos y tecnologías agronómicas para hacer un uso intensivo e inteligente de las funcionalidades naturales que nos ofrecen los ecosistemas para producir alimentos y servicios ecosistémicos, y contribuir así a la seguridad alimentaria, a restaurar suelos degradados, a la resiliencia, al reemplazo de insumo externos, y a la adaptación y mitigación ante el cambio climático (Tittonell, 2014; Kleijn *et al.*, 2019; Garibaldi *et al.*, 2019). A diferencia de la intensificación basada en tecnologías de insumos, la intensificación ecológica se centra en tecnologías de procesos y de conocimientos con visión sistémica y con una mirada de paisaje, aprovechando las interrelaciones funcionales que ofrecen los ecosistemas (Tittonell, 2014).

Las prácticas más comunes de las producciones ecológicas buscan disminuir la utilización de energía fósil, fertilizantes y plaguicidas, reciclar biomasa y nutrientes, usar eficientemente los recursos e insumos, conservar el suelo, diversificar la producción, mantener y promover la biodiversidad, utilizar bioinsumos, adoptar el manejo integrado de organismos perjudiciales, fomentar la producción local, etc. Incluyen técnicas o procesos como la fijación biológica de N, abonos verdes, abonos orgánicos, compostaje, rotaciones de cultivos (gramíneas y leguminosas), sistemas mixtos, cultivos de cobertura, cultivos consociados, labranzas reducidas, manejo de rastrojos para aumentar la cobertura de suelo, técnicas de captura de agua, plaguicidas naturales, inoculantes- biofertilizantes, bioestabilizadores, biorreguladores de crecimiento, refugios, zonas riparias y corredores biológicos, control biológico y enemigos naturales, etc.

Las técnicas descriptas pueden contribuir a incrementar los rendimientos de los productores de bajos rendimientos o de subsistencia y a reducir el impacto ambiental y la dependencia de insumos en los sistemas de producción más desarrollados (Tittonell, 2013; Tittonell *et al.*, 2016; Aparicio *et al.*, 2018).

Los pequeños y medianos productores producen alrededor de la mitad de los alimentos del mundo, en muchos casos con bajos rendimientos (Tittonell, 2013; Samberg *et al.*, 2016; Pretty *et al.*, 2018). Según Tittonell (2013), aumentar los rendimientos de los pequeños productores menos desarrollados con estas técnicas ecológicas sería más ventajoso que incrementar los rendimientos de productores más desarrollados, por su bajo costo, por producir alimentos en los lugares en los que estos y más se necesitan y por tener mínimo impacto ambiental (Figura 44). Las producciones

ecológicas pueden contribuir, entonces, a mejorar la salud y el nivel de vida de muchos productores pequeños que habitan zonas degradadas. Requieren, no obstante, mayor trabajo y capacitación. Existen ejemplos exitosos de aplicación de estas tecnologías en países y regiones pobres, pero son pocas las investigaciones e innovaciones relevantes para las necesidades de los pequeños agricultores y sus familias (Nature, 2020). Un trabajo de la FAO (Reeves *et al.*, 2016) muestra cómo los sistemas de producción con base ecológica ayudan a pequeños productores de África, Asia y Latinoamérica a incrementar los rendimientos, fortalecer su sustento y mejorar su salud, además de disminuir la presión sobre el ambiente y adaptarse al cambio climático.

En las regiones donde se practica agricultura de altos insumos es más difícil elevar los rendimientos por ser las brechas menores. Allí, donde los incrementos de las demandas a futuro son bajos o nulos se podría reducir el uso de insumos externos contaminantes reemplazándolos por prácticas más ecológicas sin que ello necesariamente signifique mermas de rendimientos. A nivel global, no obstante, con el conocimiento y el contexto actual, las producciones ecológicas sin utilización de insumos de origen sintético (orgánicas) no pueden satisfacer por sí mismas las actuales demandas de alimentos sin incrementar notablemente la superficie bajo producción (Muller *et al.*, 2017; Connor, 2018a; Sadras *et al.*, 2020).

Los rendimientos de cultivos conducidos de manera orgánica son, en promedio, un 25 % inferiores a los de los cultivos convencionales (De Ponti *et al.*, 2012; Seufert *et al.*, 2012) y algunas estimaciones indican escasas diferencias (Ponisio *et al.*, 2015). Sin embargo, Connor y colegas (Connor, 2008; Connor, 2013; Connor, 2018a; Connor, 2018b, Sadras *et al.*, 2020) concluyen que la comparación a nivel de cultivo es inadecuada por no considerar la transferencia de nutrientes desde el sistema convencional al orgánico, por la mayor presión de adversidades bióticas al implementar el sistema orgánico a gran escala, por la necesidad de mayor frecuencia de leguminosas para fijar nitrógeno en dicho sistema, y por la consecuente menor frecuencia de cereales, lo que reduce la productividad total del sistema orgánico. Cuando el análisis se hace a nivel de sistema, la productividad del método orgánico es alrededor del 60 % de la correspondiente al convencional, por lo que la adopción generalizada de la agricultura orgánica reduciría marcadamente la capacidad de carga de la agricultura mundial (Connor, 2008).

El manejo ecológico constituye un desafío mayor en sistemas de cultivo ya que estos no cuentan con las ventajas de los sistemas agrícola-ganaderos relacionadas con recuperación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, control de malezas, biodiversidad, menores requerimientos de plaguicidas y fertili-

zantes, reducción de excesos hídricos y recirculación de nutrientes. Sin embargo, la producción animal presenta las desventajas anteriormente discutidas en cuanto a ineficiencias energéticas, emisiones de GEI, y contaminación puntual (Poore y Nemecek, 2018; Lancet Commissions, 2019). Las desventajas de los sistemas de cultivos se pueden solucionar o atemperar con rotaciones de gramíneas y leguminosas, cultivos de cobertura, cultivos múltiples y consociados. La diversificación de los cultivos mejora los suelos y la nutrición, disminuye la necesidad de agroquímicos y reduce los riesgos.

En un nivel de mayor complejidad, la agricultura circular busca reutilizar y reprocesar los residuos de cosecha, de la industria agroalimentaria y de biocombustibles, de la producción animal y del consumo, y destinarlos a alimento animal, abonos, fuente de energía, u otros usos según el caso, buscando reducir los desperdicios y generar valor agregado. Esto requiere una estrecha integración de actividades y de actores.

En una mayor escala, es necesario organizar el uso del suelo, la ocupación de la tierra y la utilización de plaguicidas en función de las características ecológicas, ambientales, socioeconómicas, culturales y político institucionales del territorio con la finalidad de promover el desarrollo sostenible. Este ordenamiento territorial contempla el uso directo del suelo para la realización de actividades productivas, la preservación de la calidad ambiental y la capacidad de la tierra para sostener servicios ecosistémicos (Lattera *et al.*, 2011; Maceira *et al.*, 2015).

Los servicios ecosistémicos sustentan el bienestar general de la sociedad a través de la regulación de los gases, la purificación del aire y del agua, la regulación del clima, la regulación hídrica, el control de la erosión, la conservación de la biodiversidad, la provisión de alimentos, agua y fibra, la recreación, el turismo, la diversidad cultural, etc. Por lo tanto, pueden clasificarse en 4 categorías: de soporte, de provisión o abastecimiento, de regulación y culturales.

El ordenamiento territorial es un proceso participativo y dinámico que tiene como objetivo identificar qué áreas de tierra tienen potencial para la producción agrícola y cuáles para proveer servicios ambientales. Para alcanzar un óptimo balance de los servicios ecosistémicos es necesario: i) mantener franjas de vegetación natural en los márgenes de los ríos, arroyos y lagunas para evitar contaminación; ii) mantener corredores naturales que aseguren diversidad biológica y controladores naturales de plagas; iii) establecer áreas de restricción en el uso de agroquímicos alrededor de las zonas pobladas, escuelas rurales, áreas de recreación y de abastecimiento de agua potable, las que pueden ser utilizadas para producción agroecológica; iv) establecer áreas adecuadas

para la realización de producciones intensivas animales, industriales y mineras que pueden causar impactos ambientales negativos; y v) proteger zonas de bosques, pastizales y bañados que provean servicios esenciales (Maceira *et al.*, 2015).

El mantenimiento de la biodiversidad es un objetivo del ordenamiento territorial. Algunas de las principales acciones para frenar la pérdida de biodiversidad son detener la conversión de hábitats naturales como bosques, praderas y otros ecosistemas en tierras de producción o urbanas; establecer reservas de hábitats terrestres, marinos, de agua dulce y aéreos en cantidades y tamaños significativos, restaurar comunidades de vegetación nativa, principalmente de bosques, reinstalar especies animales nativas, reducir la explotación y el comercio de especies amenazadas, y restituir procesos y dinámicas ecológicas, entre otras prácticas (Ripple *et al.*, 2017). En capítulos anteriores se presentaron estrategias para promover la biodiversidad en las explotaciones agropecuarias.

5.2.3. Síntesis sobre estrategias para una producción sostenible

Desde el advenimiento de la agricultura, la producción agrícola aumentó siguiendo el incremento en la demanda de alimentos por parte de la población.

La revolución agrícola y la revolución verde constituyen claros ejemplos de innovación tecnológica al servicio de la producción de alimentos que postergaron las predicciones maltusianas. No obstante, la expansión de las actividades humanas produjo degradación ambiental tal como fue presentado en el Capítulo 3. El gran desafío que hoy enfrentamos es satisfacer las futuras demandas y reducir simultáneamente el impacto ambiental. Los aumentos de la producción no deberían basarse entonces en la expansión de la superficie cultivada como ocurrió principalmente en el siglo XIX y primera mitad del siglo XX, ya que esto resulta en pérdida de biodiversidad y hábitats, emisiones de gases de efecto invernadero, excesos hídricos y exposición de tierras frágiles a procesos de degradación. Los mayores esfuerzos para incrementar la producción deben enfocarse en la intensificación del uso de la tierra. Pero esta no debe basarse primariamente en mayor uso de insumos como sucedió durante la segunda mitad del siglo XX produciendo contaminación y degradación del ambiente. Por el contrario, debe centrarse en estrategias que integren tecnologías que permitan detener o revertir el daño ambiental y hacer un uso más eficiente de los recursos e insumos.

Para lograr los objetivos de producir de manera rentable los alimentos requeridos y reducir el impacto ambiental, nuestra capacidad creativa e innovadora deberá enfocarse en desarrollar,

adaptar y transferir tecnologías orientadas a tales fines. La transformación de la agricultura requiere i) rendimientos mayores y más estables por unidad de superficie y de tiempo, con cultivos más resilientes frente a escenarios con mayor variabilidad climática y frecuencia de eventos extremos, ii) un uso más eficiente de recursos e insumos, iii) frenar las pérdidas de tierra cultivable, biodiversidad, hábitats y servicios ecosistémicos, iv) reducir la contaminación del agua, suelo, aire y alimentos con productos químicos, v) disminuir el consumo no sustentable del agua especialmente donde este recurso es demandado para otros usos, y vi) reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este capítulo se presentaron ejemplos de los aportes para estos fines del manejo de suelos, las rotaciones, el mejoramiento genético, el manejo de cultivos con bases ecofisiológicas y ecológicas, la biotecnología, el manejo integrado de organismos perjudiciales y los cultivos múltiples.

En esta línea, Cassman y Grassini (2020) proponen alcanzar para los sistemas agrícolas en el 2050 una mejora del 50 % en la eficiencia de uso de agua, nitrógeno y energía, y una reducción del mismo tenor en la erosión de los suelos y en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Muchas de las técnicas necesarias para alcanzar estos objetivos ya han sido desarrolladas y utilizadas; otras necesitan de un mayor esfuerzo en investigación, adaptación tecnológica, y transferencia y extensión (Huang *et al.*, 2002; Trewavas, 2002; Tilman *et al.*, 2002; Toenniessen, 2003; Rosegrant *et al.*, 2008; Tester y Langridge, 2010; Phillips, 2010; Fedoroff *et al.*, 2010; Hall y Richards, 2013; Tittonell, 2013, Rosegrant *et al.*, 2014; EU, 2015; FAO, 2016; Pretty *et al.*, 2018; IPCC, 2019a; Satorre, 2020).

Mayor producción de alimentos y mejores servicios ecosistémicos no necesariamente son mutuamente excluyentes (Pretty *et al.*, 2018; Fernández *et al.*, 2019). Ambos objetivos pueden lograrse por medio de la aplicación de un conjunto de prácticas o tecnologías enmarcadas en una estrategia adecuada. Además, no hay una única combinación de tecnologías para estos fines.

Existen también diferentes aproximaciones para alcanzar una mayor sostenibilidad de los agroecosistemas. La intensificación sostenible, la intensificación ecológica y la agroecología, entre otros enfoques, por tender a una producción sostenible, convergen al menos parcialmente en sus objetivos y van a coexistir en un marco de ordenamiento territorial. Sin embargo, difieren en cuanto a la gradualidad o velocidad del cambio que demandan en la manera de producir (Fernández *et al.*, 2019). En este libro, por simplificación, se engloban estos conceptos dentro del término intensificación sostenible. Más allá del término que se utilice, lo

importante es definir con claridad los objetivos que se desean alcanzar. En este sentido, toda tecnología potencialmente funcional a satisfacer futuras demandas y cuidar el ambiente debe ser considerada, analizada y evaluada con rigor científico.

Las estrategias y tecnologías analizadas en este capítulo pueden aportar a la transición gradual de los sistemas de producción a través de los niveles de productividad de insumos y recursos, reducción de insumos de síntesis química, rediseño del agroecosistema y aproximación de paisaje. (Pretty *et al.*, 2018; Tiftonell *et al.*, 2016; Arístide, 2019). Algunas tecnologías duras contribuyen al desarrollo de la agricultura y al logro de los objetivos indicados. No obstante, en este trabajo se remarca el notable aporte al incremento de la productividad y a las soluciones de los problemas ambientales por parte de tecnologías basadas en procesos y conocimientos. Los conocimientos del ambiente, del funcionamiento de los cultivos, de la biología de plagas, y de las interacciones en el agroecosistema son de gran utilidad para orientar los procesos de manejo del suelo, de los cultivos, y las plagas, y son aplicables cualquiera sea la escala y la estrategia que elijamos. Estas tecnologías son de bajo costo, apropiables por el productor, y posibilitan un mayor aprovechamiento de las tecnologías duras. Sin embargo, requieren mayor dedicación por parte de los productores y grandes esfuerzos de capacitación.

Las estrategias y técnicas descritas deben ser pensadas dentro de un sistema de producción, considerando las sinergias, las complementaciones y los posibles efectos compensatorios entre las prácticas, y sus interacciones con el ambiente (Andrade, 2016b; Sadras y Denison, 2016). Este abordaje es poco frecuente en la literatura internacional debido a las complejas interacciones existentes entre los componentes del sistema y a las dificultades de su interpretación (Andrade, 2016b).

Los conceptos enunciados en los capítulos anteriores se basan en sistemas de producción de cultivos o mixtos convencionales. Sistemas de producción alternativos como urbanos y periurbanos, silvopastoriles y agroforestales pueden aportar considerablemente a la futura producción sustentable de alimentos si son adecuadamente desarrollados y mejorados. También se pueden explorar y desarrollar sosteniblemente nuevas fuentes de alimentos como algas, nuevas especies de cultivos, insectos, acuicultura, acuaponía, hidroponía, carne sintética, fotosíntesis artificial, etc. (UNEP, 2014; EU, 2015).

En las Secciones 6.1 y 6.2 se presenta un análisis integrador a nivel global y de cada continente de las estrategias productivas dirigidas a satisfacer los futuros requerimientos cuidando a la vez el ambiente.

6. LOS DESAFÍOS. INTEGRACIÓN A NIVEL DE LOS CONTINENTES

En la actualidad, y en un contexto más general, el mundo experimenta una fuerte globalización caracterizada por una creciente comunicación e interdependencia entre los distintos países que incluye componentes ambientales, tecnológicos, geopolíticos, económicos, culturales e institucionales (Ferrer, 1997; Raskin *et al.*, 2002; Wolf, 2004; Bhagwati, 2004). La población comienza a tomar conciencia de los riesgos del cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la degradación ambiental. En cuanto a los aspectos tecnológicos, resalta el desarrollo de la informática, las comunicaciones e internet que posibilitan que un individuo acceda fácilmente a una vasta cantidad de información y se contacte rápidamente con cualquier lugar del planeta. El sistema capitalista y la sociedad de consumo se imponen globalmente tras la caída de la Unión Soviética y el fin de la Guerra Fría, a la vez que surgen cuestionamientos al consumo excesivo y a la concentración económica, indicadores de la fragilidad del sistema socioeconómico mundial. Los mercados se globalizan y florecen corporaciones transnacionales, sociedades civiles internacionalmente conectadas y actores mundiales relevantes. Estos hechos indican que estaríamos en una fase temprana de transición acelerada de un nuevo proceso histórico con resultados difíciles de predecir, pero dependientes de las decisiones y acciones que tomemos (Raskin *et al.*, 2002). En esta era planetaria enfrentamos grandes desafíos en relación con el cambio climático, el deterioro ambiental, la pobreza, la seguridad alimentaria y las futuras demandas de productos agrícolas y de energía, entre otros.

En los capítulos precedentes se consideraron los efectos ambientales de las actividades agropecuarias, se estimaron las futuras demandas y se examinaron distintas estrategias para moderarlas y satisfacerlas. En este capítulo, se integran estos conceptos en un ejercicio a nivel global y de cada continente. En primer lugar, se presentan las posibles estrategias productivas que pueden satisfacer las futuras demandas considerando diferentes escenarios de moderación de dieta y de reducción de pérdidas y desperdicios. Seguidamente, se analiza la evolución de la situación ambiental, y se discute acerca de las vías para ajustarse a la capacidad bioproductiva del planeta. Finalmente, se introduce el tema de la pobreza como causal principal de la desnutrición en el mundo. Este ejercicio constituye solo una aproximación a grandes rasgos basada en varios supuestos. Sin embargo, brinda una visión general de utilidad para dimensionar la magnitud de los desafíos y oportunidades y sus contrastes entre continentes.

6.1. Satisfacer las futuras demandas de productos agrícolas

En esta sección se presenta, en primer término, un ejercicio a nivel global que muestra posibles combinaciones de estrategias de aumentos de producción agrícola para satisfacer los futuros requerimientos y de moderación de consumo. Se incluye un análisis por continente debido a los grandes contrastes existentes entre ellos.

6.1.1. Oferta de productos agrícolas

Las producciones potenciales de alimentos, relativas a los valores actuales, se muestran en la Tabla 9. A nivel global, la superficie cultivada puede más que duplicarse, principalmente debido a las tierras disponibles en África y América del Sur (Tabla 6), aunque esto debería evitarse por los varios motivos discutidos anteriormente. El posible crecimiento de la producción por aumento de la relación entre los rendimientos reales y los potenciales (Y_r/Y_p) por cierre de brechas es de un 88 % a nivel mundial. Este valor es mucho mayor en África que en el resto de los continentes debido a su bajo desarrollo tecnológico (bajos Y_r), intermedio en Asia, y menor en América, Europa y Oceanía (Figura 41). La cantidad de cultivos por año podría crecer 13 % en promedio en el escenario limitado por agua de precipitaciones y temperatura, correspondiendo los mayores valores a América (Figura 55). Hay que considerar, no obstante, que la intensificación de la secuencia en cultivos por año no se traduce en incrementos proporcionales en la producción, dependiendo de los cultivos y el ambiente. Finalmente, con base en las actuales tasas de aumento por mejoramiento genético y biotecnología (Capítulo 5.2), se estima que los rendimientos potenciales de riego y secano podrían crecer 20 %.

En la Sección 4.4 se estableció que el aumento de la demanda global de kcal de cultivos para alimento humano y para producción animal entre 2010 y 2050 ronda el 47 %. A los efectos de este ejercicio, se considera como supuesto que este valor es aplicable a todos los cultivos.

Tabla 9: Potencial de producción agrícola al 2050 para el mundo y sus continentes. Las variables incluyen superficie cultivada, rendimiento potencial (Y_p), brechas de rendimiento expresadas como rendimiento real sobre rendimiento potencial (Y_r/Y_p), e intensificación de la secuencia (cultivos por año limitados por temperatura y agua de precipitaciones). Los datos están expresados como n veces los valores actuales de referencia. Se incluye la demanda en el año 2050 (datos de Tabla 4) también expresada como n veces la demanda de 2018. Datos tomados y adaptados de información presentada en capítulos anteriores. Los datos se ponderaron por producción o superficie cuando fue necesario. Como supuesto, las brechas obtenidas para los cultivos más importantes en volumen se extrapolaron a toda la producción. Para el mundo, como la brecha es 0,88 de Y_r , la posibilidad de expansión de Y_r/Y_p es 1,88 veces el valor actual.

	Demanda	Superficie	Y_p	Y_r/Y_p	Int secuencia
	Veces				
Mundo	1,47	2,3	1,2	1,88	1,13
África	2,25	4,7	1,2	3,8	1,16
América	1,33	3,2	1,2	1,4	1,27
Asia	1,52	1,1	1,2	1,8	1,14
Europa	1,01	1,3	1,2	1,4	0,9
Oceanía	1,42	4,7	1,2	1,4	1

La Tabla 10 muestra la combinación de valores de variables de producción agrícola expresados en veces los valores actuales que cubren los aumentos requeridos de demanda de productos de cultivos hacia el año 2050. La futura oferta de alimentos se construyó para los continentes y para el mundo bajo las premisas de mantener o aumentar levemente el área cultivada, aumentar los rendimientos potenciales alrededor del 50 % del valor posible, intensificar la secuencia dentro de los límites determinados por la temperatura y las precipitaciones, y cubrir las diferencias necesarias para satisfacer la futura demanda con incrementos de Y_r/Y_p cuidando que Y_r no sobrepase el 80 % del Y_p .

Así, el incremento global del 47 % requerido se podría alcanzar manteniendo la superficie cultivada, por mejoras del 10 % en los potenciales de rendimiento bajo riego y seco, por incrementos del 25 % en la relación entre los rendimientos reales y los potenciales (Y_r/Y_p) por cierre de brechas y, el resto, por un incremento de 7 % en la producción por mayor proporción de doble cultivos (Tabla 10). Estos factores se consideran, conjuntamente, como multiplicativos.



	Demanda	Superficie	Yp	Yr/Yp	Int secuencia
	Veces				
Mundo	1,47	1	1,1	1,25	1,07
África	2,25	1,05	1,1	1,77	1,1
América	1,33	1,03	1,1	1,12	1,05
Asia	1,52	1	1,1	1,26	1,1
Europa	1,01	0,92	1,1	1	1
Oceanía	1,42	1,1	1,14	1,13	1

Los valores globales indicados son posibles de alcanzar sobre la base de los datos presentados en los capítulos anteriores y resumidos en la Tabla 9. En primer lugar, mantener la superficie cultivada a nivel global cumple con los requisitos de no sobrepasar el límite de 1.640 millones de hectáreas propuesto por UNEP (2014) (Sección 5.2.1) ni el umbral de seguridad indicado por Rockström *et al.* (2009a) (Tabla 1). Erb *et al.* (2016) concluyeron que es posible cumplir las metas productivas sin deforestar. Sin embargo, los actuales datos indican que la superficie cultivada está creciendo en distintas regiones del planeta (Sección 3.2).

Además, la mejora general de 10 % en los potenciales de rendimiento bajo riego y seco es una meta moderada y posible de lograr en función de los datos presentados anteriormente sobre los efectos del mejoramiento genético y de la biotecnología en la productividad de los cultivos (Sección 5.2.2.4; Fischer *et al.*, 2014; Hall y Richards, 2013). Adicionalmente, los aumentos de 25 % a



Tabla 10: Combinación de valores de variables de producción agrícola expresados en veces los valores actuales (2018) que cubren los aumentos requeridos de demanda de productos de cultivos (food y feed) hacia el año 2050. Los aumentos de producción se logran a través de incrementos en superficie cultivada, en rendimiento potencial de riego o seco según corresponda (Y_p), en relación entre rendimiento real y potencial (Y_r/Y_p) por cierre de brechas de rendimiento, y de incrementos de producción debidos a la intensificación de la secuencia (cultivos por año). Se presentan los datos para el mundo y sus continentes. Estas estimaciones consideran que se mantienen constantes las proporciones de volúmenes de cultivos para fines de alimentación, fibra y biocombustibles, de productos alimenticios de rumiantes sobre tierras no agrícolas, de alimentos de otras fuentes, así como las proporciones de importación y exportación de alimentos en los distintos continentes. Los aportes de oferta se toman como multiplicativos sin considerar interacción ni compensación entre factores, o sea que del producto de los datos correspondientes a las cuatro vías de expansión de la producción resulta en el valor de incremento de la demanda al 2050. Esto implica otros supuestos que se discuten más adelante.

nivel mundial en la relación entre los rendimientos reales y potenciales son consistentes con los altos valores de brechas observados para muchos cultivos y los potenciales de expansión de esta variable, aun respetando el límite del 80 % del Y_p (Sección 5.2.2.2). Dichos cierres de brechas de rendimiento se pueden lograr por medio de tecnologías de insumos con buenas prácticas agrícolas, pero como fue discutido, el énfasis debe estar puesto en aquellas tecnologías que resulten en una mayor productividad de insumos y recursos y menor impacto ambiental (Sección 5.2.2.4). Otros autores también concluyen que la mayor parte de los incrementos futuros de producción resultarán de mayores rendimientos por unidad de superficie a través de mejoras en los potenciales de riego y secano y de cierre de brechas (Vos y Bellu, 2019).

Los incrementos globales de rendimiento necesarios para no expandir la superficie cultivada (cerca de 40 %) serían alcanzados para los cultivos de papa, maíz y trigo manteniendo las tasas de incremento de rendimiento lineales observadas para el mundo en su conjunto en los últimos ocho años (Figura 40). Para cumplir con las metas indicadas en arroz y soja, se necesita acelerar las tasas de incremento de rendimiento, ya que con las actuales tendencias no se cubren los aumentos requeridos.

Por último, los aportes a la producción mundial por mayor proporción de doble cultivos o cultivos múltiples (secuenciales e intercultivos) son coherentes con los incrementos de rendimientos por unidad de tiempo informados anteriormente y con las posibilidades de aplicación de esta tecnología (Figura 55; Tabla 9; Luyten, 1995; Bruinsma, 2009; Wu *et al.*, 2018).

El análisis anterior constituye solo una aproximación que considera la situación global y que muestra una de las tantas combinaciones de factores que permiten satisfacer las futuras demandas. Los grandes contrastes existentes en demandas y posibilidades de expansión de la producción entre los distintos continentes exigen un análisis particular para cada una de ellas.

África

África es claramente el continente más comprometido dado que presenta los más altos incrementos de demanda por aumento de población y por necesidades de mejora de dieta (Tabla 4). Esta situación torna mucho más difícil no expandir la superficie de cultivo.

De mantenerse la proporción de las importaciones, los futuros requerimientos se podrían cubrir con un 5 % más de superficie cultivada, e incrementos de 10 % en los rendimientos potenciales, de 77 % por mejora en la relación Y_r/Y_p por cierre de brechas

y de 10 % por aumentos de producción debidos a intensificación de cultivos. El incremento de superficie cultivada es altamente cuestionable según lo indicado previamente en la Sección 5.2.1; pero se incluye esta opción dada la magnitud del incremento de demanda y la disponibilidad de mucha tierra potencialmente cultivable (Tabla 6). Para su uso deberán tenerse en cuenta las consideraciones realizadas en capítulos previos. Sin embargo, en muchos casos, las nuevas tierras no están fácilmente accesibles por falta de infraestructura o por grandes distancias.

Además, dado el bajo nivel tecnológico actual (Figuras 45 y 46), su producción por unidad de superficie puede aumentar notablemente (Tittonell, 2013; Dimes *et al.*, 2015; Roxburgh y Rodriguez, 2016). Por ser el continente con las brechas de rendimiento más amplias (Figura 41), el aporte por mejora de la relación Y_r/Y_p puede ser considerablemente mayor que en otras regiones y que el indicado en la Tabla 10. Este cierre de brechas se puede centrar en técnicas de intensificación ecológica basadas en conocimiento y procesos (Tittonell, 2013). Estas técnicas pueden mejorar los rendimientos y la producción de los pequeños productores. Cuando se apliquen insumos adicionales, como fertilizantes y agroquímicos (Van Itersum *et al.*, 2019), es necesario seguir las recomendaciones de las buenas prácticas agrícolas para evitar los errores cometidos en otras regiones.

Para contribuir al aumento de los rendimientos potenciales y reales se podrá recurrir también al riego y a mayores mejoras genéticas de los rendimientos potenciales de riego y secano. You *et al.* (2011) concluyen que el continente africano tiene posibilidades de expandir la superficie bajo riego de 13 millones a 37 millones de hectáreas. Además, un incremento del 10 % en los rendimientos potenciales de secano y riego es conservador ya que se pueden lograr importantes avances por mejoramiento genético. En esta región, los beneficios de la biotecnología y el mejoramiento genético pueden ser de gran relevancia en tanto provean cultivares con tolerancia a sequía, salinidad y adversidades bióticas y alimentos de mejor calidad nutritiva.

Finalmente, los incrementos de producción por intensificación del 10 % de la secuencia de cultivos es factible de alcanzar en este continente, a través de prácticas de doble cultivo e intercultivo (Wu *et al.*, 2018; Figura 55).

Las actuales tasas de incremento de rendimiento de los cultivos (1990-2018; Figura 40) en África están muy por debajo de las necesarias para satisfacer las futuras demandas en 2050, aun considerando el aumento de la superficie cultivada y la intensificación de la secuencia. De los cinco principales cultivos, el arroz, el maíz y la papa son los que presentan menores aumentos relativos. La

situación es menos favorable aun si se toman en cuenta solamente las tendencias de los últimos ocho años (FAO, 2020).

Como agravante, los requerimientos de aumentos de producción son aún mayores (Van Ittersum *et al.*, 2019) si se considera la sustitución de las importaciones de alimentos. Para el continente africano, la dependencia de la importación de cereales es del 28,9 % (FAO, 2020). La situación se torna más seria al considerar la disparidad que existe entre sus distintas regiones. África subsahariana es la región del mundo que mayores crecimientos poblacionales tendrá en las próximas décadas y que presenta los más altos índices de desnutrición (UN, 2019; Vos y Bellu, 2019; Ten Berge *et al.*, 2019). Además, extensas áreas están seriamente amenazadas por el cambio climático (Capítulo 3). África subsahariana presenta, sin embargo, oportunidades para cerrar las enormes brechas de rendimiento y dispone de amplias cantidades de agua para riego (Aquastat, 2019).

Asia

Si bien en Asia la situación no es tan complicada, este continente aumentaría su demanda un 52 % entre 2018 y 2050 debido al crecimiento poblacional y, en mayor medida, a la suba del poder adquisitivo (Tabla 4). Esta demanda se satisfaría con aumentos de 10 % de sus rendimientos potenciales, por incrementos del 26 % en la relación Y_r/Y_p por cierre de brechas, y por aumento de 10 % de la producción por intensificar la secuencia de cultivos. Las actuales tasas de incremento de rendimiento de los principales cultivos calculadas entre 1990 y 2018 (Figura 40) son en general cercanas a las requeridas para satisfacer las futuras demandas a través de aumentos en Y_p y en la relación Y_r/Y_p (1.1×1.26) (Tabla 10). De lograrse estas metas, Asia no necesitaría ampliar la superficie bajo cultivo.

Estas cifras son muy inferiores a las mencionadas para el continente africano. De cualquier manera, Asia en su conjunto no tiene grandes posibilidades de expansión del área cultivada (Tabla 6) y su nivel tecnológico en cuanto a uso de insumos es alto (Figura 45). Los aumentos de rendimiento vendrían principalmente por i) mejoramiento genético y biotecnología que resulten en cultivares con mayor tolerancia a estrés biótico y abiótico y de mayor potencialidad de rendimiento y ii) por manejo de cultivos para cerrar brechas y mejorar la relación Y_r/Y_p a través de mayor adaptación de los cultivos a los ambientes de producción. La utilización de tecnologías de insumos (riego, fertilizantes y agroquímicos en general) requiere extremos cuidados para evitar y revertir los pro-

blemas de contaminación y degradación ambiental que se han producido y se siguen produciendo en países de este continente. Por lo tanto, el cierre de brechas debería lograrse reemplazando, gradualmente y al menos parcialmente, las tecnologías de insumos indicadas por otras que resulten en mayor productividad de insumos y recursos y en menor impacto ambiental (Cui *et al.*, 2018; Stuart *et al.*, 2018).

Los requerimientos de producción de alimentos son mayores si se fijan objetivos para sustituir importaciones. En el territorio asiático, la dependencia de la importación de cereales es del 8,2 %, con grandes diferencias entre países (FAO, 2020).

Resto de los continentes

Para los demás continentes, exportadores netos de alimentos, el contexto está mucho menos comprometido.

En América, los requerimientos promedio futuros se pueden cubrir con un leve incremento de la superficie cultivada, con aumentos del 10 % del rendimiento potencial, del 12 % en la relación Y_r/Y_p por cierre de brechas y con aumentos de la producción del 5 % por intensificación de la secuencia. Estos datos suponen que se mantiene la proporción de exportaciones, ya que en esta región la producción actual supera las demandas.

Sudamérica posee un enorme potencial agrícola y puede cubrir sus demandas y ampliar los saldos exportables a través de distintas estrategias, ya que dispone de mucha tierra de reserva, agua para riego, y tiene buena posibilidad de aumentar los rendimientos. Esto es compatible con la preservación de áreas forestales, con la disminución de los procesos de erosión en áreas marginales, y con el mantenimiento de la calidad ambiental. Contrariamente, América del Norte tiene menores posibilidades de expandir el área de cultivos o de aumentar los rendimientos por uso de tecnologías de insumos.

Oceanía también muestra una realidad muy favorable a futuro, con posibilidades de expansión del área agrícola y de mejoras tecnológicas. Los requerimientos futuros manteniendo proporción de exportaciones se pueden cubrir con aumentos del 10 % en la superficie cultivada, del 14 % en el rendimiento potencial, y del 13 % de la producción por cierre de brechas. Estos datos son muy conservadores en función de los potenciales de expansión de producción de este continente (Tabla 9).

Finalmente, Europa exhibe una situación todavía más aliviada, ya que si bien tiene poco potencial de expansión de su superfi-

cie productiva y en general produce con alto nivel tecnológico, no incrementará su demanda de alimentos pues su población crece poco y su dieta actual es abundante. Por aumentos de los potenciales de rendimiento puede incluso reducir la superficie cultivada resultando en mayores superficies para recreación y reservas. En este continente además, se están implementando procesos de detoxificación por el reemplazo de tecnologías de insumos de síntesis química por otras duras y de procesos (Lechenet *et al.*, 2017; Tiftonell, 2013, Fig. 46).

Como fuera descrito en las Secciones 5.1.1 y 5.1.2, las futuras demandas pueden ser moderadas si se limita el consumo de carne y de calorías en la dieta y si se reducen las pérdidas y desperdicios de alimentos. Seguidamente, se analizan los efectos de dichas moderaciones sobre las necesidades de aumentos de producción para el mundo y sus continentes.

6.1.2. Moderación de las demandas

La dieta tiene un fuerte efecto en los valores de las demandas de productos agrícolas. Los aumentos de demanda global promedio para el 2050 varían entre alrededor de cero y 200 % según la energía consumida y la relación entre calorías vegetales y animales de la dieta que se considere a futuro (Figura 36). Por lo tanto, los requerimientos de alimentos vegetales para consumo humano y producción animal se reducirían en la medida que se limite el consumo de carne y de calorías totales (Figura 57).

La moderación de la dieta hasta valores de 4.000 kcal de cultivos requeridas por persona y por día no achica la futura demanda en África ya que estos niveles de consumo no serían alcanzados en el 2050 debido a que la dieta actual es pobre y con baja relación de energía animal/vegetal y los incrementos futuros en poder adquisitivo son bajos en valor absoluto.

En Asia, limitar la energía vegetal demandada diariamente para alimento humano y animal a menos de 5.500 kcal de cultivos por habitante resulta en reducciones de la producción de cultivos necesaria al 2050. Esto requiere evitar que los países con dietas más limitadas copien las costumbres consumistas occidentales actuales. Sin embargo, en algunas naciones del este y sudeste asiático se está produciendo un importante incremento en consumo de carne.

En el resto de los continentes, y, por lo tanto, en el promedio mundial, moderar el consumo de carne y el contenido de calorías en

la dieta resulta en fuertes disminuciones de futuras demandas de productos de cultivos.

Los datos generales indican que si todos los habitantes del mundo consumieran una dieta vegetariana en el 2050, la producción actual alcanzaría para satisfacer las futuras demandas (Figura 36).

Las regulaciones en el consumo brindan los beneficios ya mencionados en cuanto a reducir la presión sobre el ambiente y a mejorar la salud por ingerir dietas más sanas (Sección 5.1.1; Lancet Commissions, 2019). De ser exitosas, los hábitos dietarios serían más baratos, más sanos y más inocuos para el ambiente.

Reducciones en la demanda de calorías totales para alimentación humana y animal son posibles (Keating *et al.*, 2014; Alexander *et al.*, 2019). Para esto es necesario romper la asociación directa entre consumo de carne/calorías totales y poder adquisitivo (Figura 31).

Evitar que China siga incrementando el consumo de carne tiene importantes efectos en la demanda futura global por la elevada población de este país. Algunos pronósticos indican que el número de vacunos sufrirá fuertes reducciones en algunos países. La moderación de la dieta, los sustitutos a base de proteínas de otras fuentes y la carne sintética serían los responsables de este efecto (Bonny *et al.*, 2017; Tubb y Seba, 2019; Lancet Commissions, 2019). Tiene que considerarse, no obstante, la relevancia de la producción de carne y leche de rumiantes en tierras no aptas para cultivo.

Otro factor que puede disminuir las demandas de alimentos es la reducción de pérdidas y desperdicios que alcanzan un 31 % a nivel global (Sección 5.1.2). Con la eliminación total de las pérdidas y desperdicios, casi no se requieren incrementos de producción entre 2018 y 2050 considerando al mundo en su conjunto (Figura 58). En Asia, la demanda futura, expresada como veces el valor actual, caería de 1,52 a 1,09 y en África de 2,25 a 1,44. La eliminación total de estas mermas es una meta muy ambiciosa. Sin embargo, reducciones parciales también resultan en retracciones de importancia en las futuras demandas de productos de cultivos (Keating *et al.*, 2014; Alexander *et al.*, 2019). En línea con estas estimaciones, Kummu *et al.* (2012) afirman que la disminución de las pérdidas y los desperdicios a la mitad para el año 2025 permitiría sustentar a 1.000 millones de personas adicionales.

El significativo impacto de las pérdidas y desperdicios en la futura producción de alimentos y, por lo tanto, en la presión que ejerceremos sobre el ambiente, indica la necesidad de tomar medidas adecuadas para achicar esta fuente de mermas.



Figura 57: Reducción porcentual de la demanda de alimentos en el año 2050 por fijar límites a la energía de productos de cultivos demandada por habitante para alimentación humana directa e indirecta a través de la alimentación animal. Datos promedio para el mundo, África, Asia y el resto de los continentes. Los valores de las futuras demandas sin imponer límites surgen de adaptaciones de datos de Gpmindr (2020) y Tilman *et al.* (2011).

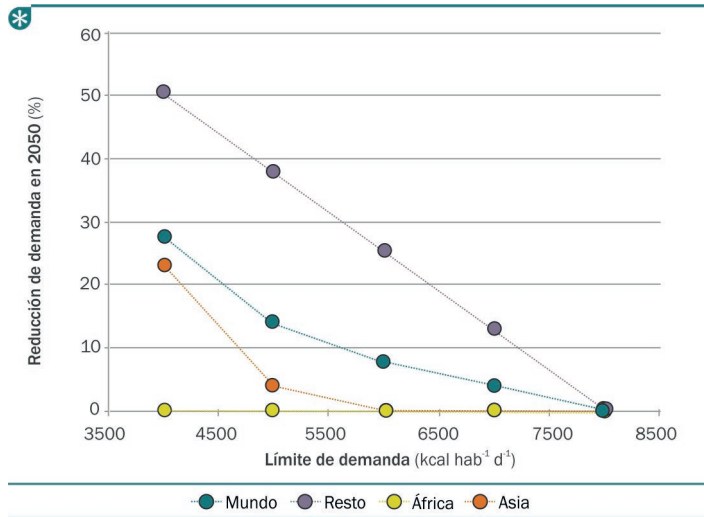
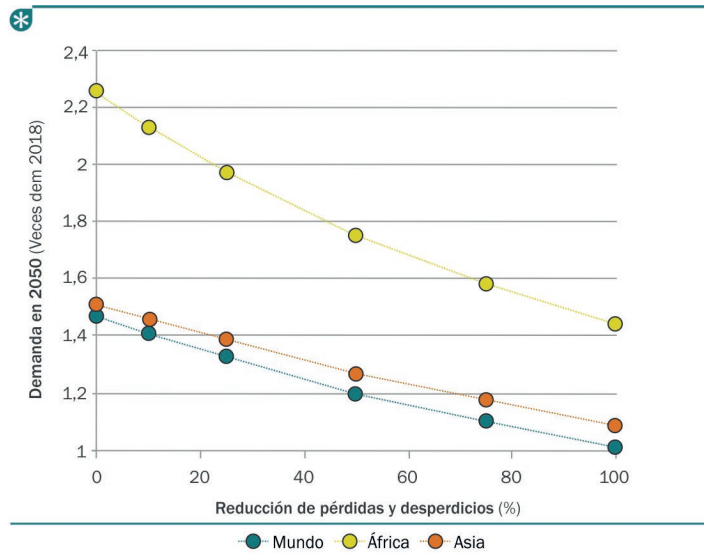


Figura 58: Demanda de productos de cultivos en 2050 expresada como veces la demanda del año 2018 en función de la reducción en pérdidas y desperdicios. Datos promedio para el mundo, África y Asia. Las reducciones se calcularon sobre la base de los valores de pérdidas y desperdicios de la Figura 38 (HLPE, 2014). Se considera demanda tranquera adentro.



Existen posibles combinaciones de ambas estrategias que resultan en la no necesidad de incrementar la producción. Sin embargo, las proyecciones de las actuales tendencias sugieren que la producción de alimentos continuará creciendo (Figuras 12 y 34). Además, los datos globales indican que en las últimas dos décadas no se evidenciaron tendencias de reducción de pérdidas y desperdicios ni de moderación del consumo de carne en los países ricos o en los que están mejorando significativamente su poder adquisitivo.

La conversión de las dietas y la disminución de las pérdidas y desperdicios no son objetivos sencillos de lograr (Alexander *et al.*, 2019). No obstante, tal como fuera previamente indicado, se pueden lograr progresos incrementales en cuanto a estos objetivos impulsando dietas moderadas y sanas, procesamientos y consumos más eficientes, e inversiones en infraestructura para evitar pérdidas, entre otras acciones.

Para estos cambios culturales en los hábitos nutricionales y de producción, se necesitan acciones de educación y concientización de la población acerca de los riesgos de dietas no saludables y de los beneficios de moderar las demandas.

Las necesidades de aumentos de producción de cultivos se pueden morigerar además, moderando la utilización de granos para biocombustibles y fibra, mejorando la eficiencia de la producción animal, aumentando la producción de rumiantes en tierras no agrícolas y de alimentos de otras fuentes, y reduciendo la tasa de fecundidad, entre otras acciones (Secciones 4.3 y 5.1.3). En conclusión, la reducción de demandas por moderar dietas y disminuir pérdidas y desperdicios de alimentos pueden bajar significativamente los requerimientos de aumentos de la producción agrícola entre 2018 y 2050. Achicar pérdidas y desperdicios genera beneficios en todos los continentes, mientras que moderar la dieta impacta en mayor medida en Europa, América, Oceanía y algunos países de Asia.

A manera de ejercicio para dimensionar la magnitud de estos factores combinados sobre la futura demanda, se calculan los efectos de disminuir las pérdidas y desperdicios un 30 % y de limitar la demanda de kilocalorías de cultivos para alimentación humana directa y para producción animal a 6500 kcal/cap/día. Estos efectos combinados implican llevar los valores requeridos de incrementos de la producción entre 2028 y 2050 del 47 al 22 % en el mundo, del 125 al 92 % en África y del 52 al 36 % en Asia (Tabla 11). El valor límite para las kcal de cultivos demandadas no resulta en reducciones de la demanda total en África y en Asia, pues estos continentes no alcanzarían dichos niveles de consumo en 2050.



	Demanda		
	a	b	c
Mundo	1,47	1,30	1,22
África	2,25	1,92	1,92
América	1,33	1,15	0,94
Asia	1,52	1,36	1,36
Europa	1,01	0,89	0,72
Oceanía	1,42	1,25	1,02

Tabla 11: Valores de la demanda de productos de cultivos en 2050 en el mundo y sus continentes, expresada como n veces los valores correspondientes a la de 2018, estimada a partir de incrementos de poder adquisitivo y población (a) y considerando reducciones del 30 % en las pérdidas y desperdicios (b) y una reducción adicional por fijar un límite a las futuras calorías demandadas para alimentación humana y animal en 6500 kcal/cap/día (c).



Tabla 12: Combinación de valores de variables de producción agrícola expresados en veces los valores actuales (2018) que cubren los aumentos requeridos de demanda de productos de cultivos (food y feed) en 2050 ajustada por la reducción del 30 % de las pérdidas y desperdicios de alimentos y por fijar un límite a la demanda de futuras calorías de cultivos en 6500 kcal/hab/día. Demanda expresada como veces la demanda de 2018. Los aumentos de producción se logran a través de incrementos en superficie cultivada, rendimiento potencial de riego o seco según corresponda (Yp), en la relación entre rendimiento real y potencial (Yr/Yp) por cierre de brechas de rendimiento, y de incrementos de producción debidos a la intensificación de la secuencia (cultivos por año).

Datos para el mundo, África y Asia. Estas estimaciones consideran que se mantienen constantes las proporciones de volúmenes de cultivos para fines de alimentación, fibra y biocombustibles, de productos alimenticios de rumiantes sobre tierras no agrícolas, de otras fuentes de alimentos, así como las proporciones de importación de alimentos en África y Asia. Los aportes de oferta se consideran multiplicativos sin contemplar interacción ni compensación entre factores.

Considerando una demanda ajustada de productos de cultivos (food y feed) en 2050 por reducción del 30 % de las pérdidas y desperdicios de alimentos y por fijar un límite a las futuras calorías de cultivos en 6500 kcal/hab/día, las metas globales se podrían alcanzar achicando un 5 % la superficie cultivada, con mejoras del 10 % en los potenciales de rendimiento bajo riego y seco, con incrementos del 16 % en la relación entre los rendimientos reales y los potenciales (Yr/Yp) por cierre de brechas, y con un leve incremento de la producción (1 %) debida a la cantidad promedio de cultivos por año (Tabla 12). Globalmente, estos valores son mucho más factibles de alcanzar en virtud de las actuales tasas de progreso en rendimiento potencial y real de los principales cultivos (Figura 40).



	Demanda	Superficie	Yp	Yr/Yp	Int secuencia
	Veces				
Mundo	1,22	0,95	1,10	1,16	1,01
África	1,92	1,00	1,10	1,69	1,04
Asia	1,36	1,00	1,10	1,18	1,05

Para África, la demanda reducida en el nuevo escenario se puede cubrir sin aumentos de superficie cultivada, y con incrementos de 10 % en los rendimientos potenciales, de 69 % en la relación Yr/Yp por cierres de brechas, y de 4 % de producción por intensificación de cultivos. Las actuales tasas de incremento de rendimiento de los cultivos en África (1990-2018; Figura 40) también están muy por debajo de las necesarias para satisfacer las futuras demandas moderadas en 2050. Como se indicó para el escenario anterior, la situación es menos favorable aún si se toman en cuenta solamente las tendencias de los últimos ocho años (FAO, 2020). No obstante, los incrementos necesarios son factibles de lograr en función de las potencialidades del continente. Nuevamente, el desafío se magnifica si se incluyen en el cálculo la sustitución de las importaciones de alimentos con productos locales. El nuevo escenario significa un alivio en la tarea a encarar y simboliza la relevancia de realizar denodados esfuerzos para disminuir pérdidas y desperdicios de alimentos. Para este continente es además crítico atender el problema de las altas tasas de fecundidad (Sección 5.1.3).

En Asia, con el nuevo escenario de ajuste de demanda, se requeriría un 36 % de incremento de la producción al 2050, lo que se podría cubrir sin necesidad de ampliar la superficie de cultivos y con mejoras del 10 % en los rendimientos potenciales, del 18 % en la relación Yr/Yp por cierre de brechas, y aumentos de 5 % en la producción por intensificar la secuencia de

cultivos. Estos valores son realistas en función de la información presentada en la Tabla 9.

Con respecto a América, Europa y Oceanía, la moderación de la dieta y la disminución de pérdidas y desperdicios reducen los requerimientos de superficie cultivada para alimentar sus poblaciones, lo que resultaría en incrementos de superficie para recreación o reservas y en mayores proporciones de saldos exportables que pueden cubrir los déficits de otras regiones. La limitación de la dieta a un determinado valor de energía de productos vegetales demandada produce importantes ahorros en estos continentes por consumirse actualmente dietas promedio ricas en carne y calorías (Figura 29). Para las poblaciones de estas regiones, la adecuación de la dieta respondería a motivos relacionados con el cuidado de la salud y del ambiente. Es necesario igualmente considerar que, en muchos de los países de los mencionados continentes, persisten problemas de desnutrición en un porcentaje de la población que los valores promedio no reflejan.

Las futuras demandas se achicarían si se reducen aún más las pérdidas y los desperdicios de alimentos y si se modera aún más el consumo de carne y de calorías en la dieta tal como indican las Figuras 57 y 58. En términos globales, la moderación de la demanda por dichas vías disminuiría los requerimientos de tierra cultivada (Alexander *et al.*, 2019) y facilitaría la reducción del uso de insumos de síntesis química (Muller *et al.*, 2017), especialmente de fertilizante nitrogenado (Connor, 2018a; Sadras *et al.*, 2020).

Con respecto al escenario de disminución de futuras demandas, achicar las pérdidas y desperdicios un 30 % es una meta moderada y alcanzable si se realizan las acciones requeridas en educación, investigación e infraestructura (HLPE, 2014). Además, el límite fijado de kcal de cultivos demandadas para alimentación humana y animal puede ser menor de acuerdo con las recomendaciones de Lancet Commissions (2019).

En términos generales y atendiendo a los conceptos previamente enunciados, la expansión de la superficie cultivada debería limitarse ya que está asociada con pérdidas de biodiversidad, degradación de hábitats, emisiones de gases de efecto invernadero y excesos hídricos. Por otro lado, las tecnologías de insumos como la fertilización y el uso de plaguicidas han sido causas de contaminación y degradación ambiental. Si queremos incrementar los rendimientos recurriendo a tecnologías de insumos será necesario que se respeten los protocolos de buenas prácticas agrícolas (Jaime *et al.*, 2013) para reducir el impacto sobre el ambiente y la salud. Incrementar los rendimientos con mayor productividad de recursos e insumos y sin impacto ambiental requerirá importantes aportes de tecnologías intensivas en conocimientos y procesos en interacción con tecnologías duras tradicionales y novedosas.

Por la magnitud de la tarea a encarar en África subsahariana y en algunos países de Asia, parte de sus futuras demandas necesitan continuar siendo satisfechas por la producción de otras regiones con saldos exportables, aunque esto tiene un costo en huella de carbono. Para esto, se requiere equilibrar la balanza de pagos con la exportación de otros productos. La intervención y solidaridad internacional será necesaria en aquellos casos en los que no se cubran las necesidades de una nutrición adecuada.

Los cálculos se realizaron con datos promedio de continentes, por lo que resta considerar que existen notables contrastes entre países en lo referido a producción de alimentos y poder adquisitivo por habitante y en la dependencia de importación de alimentos (Tabla 13). A esto se le suman las diferencias en ingresos dentro de cada país (Sección 6.3.4).



Tabla 13: Producción de cereales y de carne, ingreso por habitante y por año, y dependencia de importaciones de cereales (DIC) para 4 países contrastantes. $DIC = [(I-E)/(P+I-E)] * 100$. Donde I son importaciones, E exportaciones y P producción. Datos correspondientes al año 2017 (FAO, 2020).



	Cereales/hab	Carne/hab	Ingreso	DIC
	t/hab/año	t/hab/año	USD /hab/año	%
China	0,42	0,06	15500	3,4
EE. UU.	1,43	0,14	54470	-19,1
Francia	1,06	0,09	38960	-86,3
Nigeria	0,26	0,01	920	9,2

6.1.3. Síntesis

Este ejercicio, que debe ser tomado con precaución por los supuestos que implica, muestra posibles combinaciones de estrategias para satisfacer las futuras demandas de productos agrícolas para el mundo y para cada uno de los continentes.

Muchos datos sobre los que elaboramos las conclusiones de este capítulo requieren de mayor precisión, como por ejemplo la estimación de las pérdidas y desperdicios y de las brechas de rendimiento de algunos cultivos. Otros datos requieren de ajustes periódicos, como los referidos a incrementos del poder adquisitivo y su relación con la calidad de la dieta. Además, los resultados obtenidos se basan en varios supuestos, como la extrapolación de los incrementos de demanda a cultivos con otros fines, el mantenimiento de la proporción de importaciones y exportaciones en los diferentes continentes, y la disponibilidad y accesibilidad de saldos exportables. Tampoco se consideraron los efectos de mejoras en la eficiencia de transformación de productos vegetales en productos animales, ni de variaciones en los aportes relativos de la producción de carne y lácteos de rumiantes sobre tierras de pastizales no cultivables. Está implícito, además, el supuesto de que la oferta o producción es similar a la demanda. Otro supuesto es

que los factores de producción se consideraron multiplicativos. Sin embargo, puede haber ciertas interacciones y compensaciones entre los mencionados factores ya que, por ejemplo, la expansión de la frontera agrícola puede afectar los rendimientos reales y potenciales. Además, el mejoramiento por potencial de rendimiento puede ampliar las brechas tecnológicas. No obstante, datos previamente presentados (Figuras 48, 50 y 51) indican que mejoras en el potencial de rendimiento pueden darse sin reducir la relación Y_r/Y_p , y que ambas estrategias pueden complementarse. Hay que contemplar también que los aumentos de producción indicados por intensificación de la secuencia no son necesariamente proporcionales al número de cultivos cosechados por año. Finalmente, las mejoras en los rendimientos constituyen un reto aún mayor en el contexto de cambio climático y degradación ambiental.

Este ejercicio presenta, para el mundo y para cada continente, una de las posibles combinaciones de estrategias y prácticas para cubrir las demandas en el año 2050. Si bien es una simplificación, brinda una idea general de los desafíos productivos y de las vías disponibles para enfrentarlos. Nos orienta acerca de cómo las distintas estrategias productivas pueden aportar a satisfacer futuras demandas y de cómo la moderación de la dieta y la reducción de las pérdidas y desperdicios de alimentos impactan en la futura necesidad de producción. Ofrece, por lo tanto, un marco útil para evaluar las estrategias para alcanzar una agricultura que provea de manera sostenible los alimentos requeridos por la humanidad.

En síntesis, las metas productivas a nivel global al 2050 se pueden alcanzar aumentando los rendimientos potenciales, cerrando brechas e incrementando la intensidad de la secuencia; más aún si se moderan las demandas y se reducen las pérdidas y desperdicios. Sin embargo, la situación es muy dispar entre continentes y regiones.

A juzgar por los actuales niveles de producción, las metas productivas globales fijadas en el 2010 se estarían alcanzando (Figura 34). El volumen total de cereales siguió creciendo con una tasa promedio de 69 millones de toneladas por año en los últimos años (superior a la de las décadas anteriores; Figura 12), llegando en 2018 a 2.964 millones, valor superior al calculado para dicho año según proyecciones lineales de las estimaciones realizadas sobre la base de los años 2005-2010 (Figura 34). Esto, junto con las mayores producciones promedio por habitante, indicaría que en los últimos años no se han logrado progresos globales en moderar las demandas y en reducir las pérdidas y desperdicios.

En la próxima sección, se aborda el análisis del nivel de cumplimiento de las metas ambientales planteadas considerando la agricultura y las actividades humanas en general. Se evalúan de manera integrada, para el mundo y los continentes, datos de su-

perficie cultivada y de bosques, uso de fertilizantes y plaguicidas, extracciones de agua azul, utilización de energía, y emisiones de gases de efecto invernadero, y se discute además acerca de las vías para ajustarse a la capacidad bioproductiva del planeta.

6.2. Reducir el impacto ambiental

En la antigüedad, el impacto de la agricultura y de las otras actividades humanas era bajo. A principios del siglo XX, la población era de solo 1.500 millones de habitantes, se consumían menos calorías diarias y menos carne por persona, y se requería menos agua para producir los alimentos en comparación con la actualidad. La agricultura no utilizaba agroquímicos sintéticos y se emitían bajas cantidades de gases de efecto invernadero. El impacto ambiental global era bajo y se debía mayormente a las consecuencias negativas de las deforestaciones, ya que la producción de alimentos crecía principalmente debido a expansiones de la superficie cultivada. Pero durante el siglo XX los aumentos de producción agrícola estuvieron estrechamente asociados con un creciente impacto ambiental de las actividades humanas y de la agricultura en particular (Capítulo 3), que consistió, principalmente, en importantes deforestaciones, degradación del suelo, contaminaciones por el uso de insumos, emisiones de gases de efecto invernadero, y pérdida de biodiversidad, entre otras consecuencias.

¿Estamos en el camino correcto en cuanto a reducir el impacto ambiental de la agricultura y de las actividades humanas en general?

6.2.1. La agricultura y las metas ambientales

En cuanto a las variables agrícolas vinculadas al ambiente, las metas establecidas no se están alcanzando. La utilización de fertilizantes creció sin pausa en este siglo (Figura 59) y aumentó más en valores relativos que el crecimiento poblacional (Figura 60). El uso de plaguicidas también aumentó significativamente durante este siglo (Figura 59) en mayor proporción que el crecimiento demográfico (Figura 60), aunque muestra una desaceleración a partir del año 2010, en parte debida a la difusión de productos que requieren menor cantidad de principio activo por ha. Las extracciones de agua para uso agropecuario y las emisiones de gases de efecto invernadero por la agricultura crecieron aunque en menor proporción que la población (Figuras 59 y 60). El incremento de las emisiones se produjo a tasa constante, mientras que las extracciones de agua azul mostraron una desaceleración en los últimos años, reflejando la escasez creciente de este recurso.

La superficie cultivada mostró un comportamiento diferente ya que solo aumentó cerca del 5 % desde el año 2000. Este freno a

la expansión, junto con la labranza conservacionista, redujo las tasas de degradación de suelos en el mundo en comparación con el siglo pasado (Borrelli *et al.*, 2017). Aun así, los procesos de degradación de suelos afectan a unos 2.000 millones de personas, de los cuales el 95 % vive en países en vías de desarrollo (Le *et al.*, 2016; Barbier y Hochard, 2018). De manera alarmante, la superficie cultivada se expandió a partir del año 2010 (Figura 60). Finalmente, la producción de cultivos y de carne creció sin pausa durante el siglo XX (Figura 59), superando en valores relativos al aumento de la población (Figura 60).

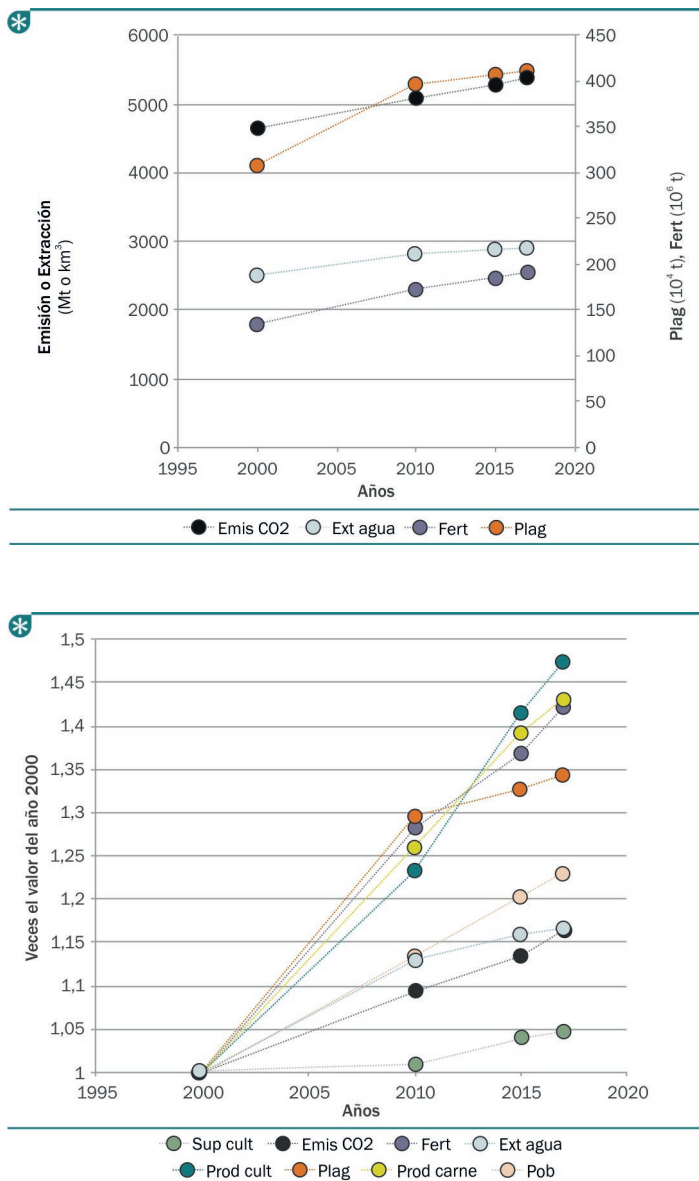
En síntesis, el uso creciente de agroquímicos, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, las mayores extracciones de agua y la expansión del área cultivada indican claramente que las metas de reducción de impacto ambiental previamente establecidas no se están cumpliendo (Foley *et al.*, 2011, Hunter *et al.*, 2017). Se observa, sin embargo, una desaceleración en el uso de plaguicidas y en las extracciones de agua azul en la segunda década de este siglo.

Asia es el continente que presenta los mayores niveles de producción de alimentos, de superficie cultivada, de emisiones de gases de efecto invernadero por la agricultura y de uso de insumos agroquímicos (Tabla 14; Figura 45). Le siguen América, Europa, África y Oceanía. Los altos valores para el continente asiático se deben en mayor medida a su elevada cantidad de habitantes. No obstante, los mayores aumentos porcentuales en producción de alimentos, superficie de cultivo y uso de fertilizantes por la agricultura en el actual siglo se produjeron en África (Tabla 14), que es el continente que mayor crecimiento poblacional relativo experimentó. El uso de plaguicidas creció en mayor proporción en Oceanía y América.



Figura 59: Evolución de la producción de cultivos y de carne (millones de t por año), la población (millones de habitantes), la superficie de cultivos (millones de ha), las emisiones de gases de efecto invernadero por la agricultura (millones de t de eq CO₂ por año), el uso de fertilizantes (millones de t) y de plaguicidas (10⁴ t de p.a.) y la extracción de agua azul para uso agrícola (km³ por año) en el mundo para los años 2000, 2010, 2015 y 2017. Elaborado sobre datos de FAO (2020), UN (2019), Aquastat (2019). Los datos de emisiones no incluyen las debidas al cambio de uso de la tierra, ni al sector forestal.

Figura 60: Evolución de valores relativos a los del año 2000 de la producción de cultivos y de carne, la población, la superficie de cultivos, el uso de fertilizantes y plaguicidas, las emisiones de gases de efecto invernadero por la agricultura, y la extracción de agua azul para la agricultura en el mundo desde 2000 a 2017. Datos derivados de la Figura 59. Elaborado sobre datos de FAO (2020), UN (2019) y Aquastat (2019).



Los datos relativos a la cantidad de habitantes son también útiles para analizar la situación de cada continente en cuanto al estado de su población, la intensificación de la producción y la degradación ambiental (Tabla 15). África muestra los índices más bajos de producción y uso de fertilizantes y plaguicidas por habitante. La extracción de agua por persona para uso agrícola solo es inferior en Europa, un continente más húmedo en el que predomina el uso doméstico e industrial.

Asia, por su parte, presenta los menores valores de superficie cultivada y de emisiones por individuo, pero los mayores de uso de agua *per cápita* (Tabla 15). Además, a este continente, que es el que utiliza las mayores cantidades totales de agroquímicos, le corresponden moderadas cantidades de fertilizante y plaguicida por habitante debido a su elevada población (Figura 45). Finalmente, América y Oceanía, exportadores de alimentos, presentan los más altos valores por individuo de superficie de cultivos, producción de cultivos y de carne, emisiones de GEI y uso de agroquímicos.

Las variables de producción, de uso de fertilizantes y plaguicidas, de extracción de agua y de emisiones de gases de efecto invernadero por la agricultura crecieron en mayor proporción que la superficie cultivada durante el presente siglo, a nivel global (Figura 60) y, con pocas excepciones, en todos los continentes (Tabla 14). Dichas variables, salvo las emisiones de GEI y las extracciones de agua, también aumentaron más que la población a nivel global, pero con mayores contrastes entre los continentes y las regiones. En las últimas décadas, se lograron mayores producciones de alimento por habitante en el mundo y en todos los continentes (Tabla 14). Por el contrario, en África subsahariana, esta variable presentó caídas en los últimos años (2015-2018) (FAO, 2020).

La reducción en superficie cultivada *per cápita* (Tabla 14) es indicadora de la intensificación del uso de la tierra y de los avances tecnológicos asociados. En la sección anterior se demostró que existen alternativas de regulación de demanda y de oferta productiva que evitan expandir la superficie cultivada. Esto facilita la preservación de biodiversidad y de hábitats naturales, pero las técnicas de producción deben estar acordes con los conceptos de intensificación sostenible enunciados en las Secciones 5.2.1 y 5.2.2.4.

*

		Cult	Carne	Sup	Fert	Plag	Emis	Pob
		Mt	Mt	Mha	Mt	t10 ³	Gt	M
Mundo	2000	4.270	233,4	1.492	134,9	3.063	5,09	6.143
	2017	6.297	334,8	1.561	192,2	4.114	5,41	7.546
África	2000	409	11,6	230	3,9	62	0,83	811
	2017	719	19,7	279	6,5	80	0,95	1.246
América	2000	977	73,8	370	33,6	902	1,31	834
	2017	1.454	104,2	372	50,2	1.328	1,34	998
Asia	2000	2.113	91,4	561	72,3	1.621	2,23	3.741
	2017	3.183	141,9	589	108,8	2.160	2,34	4.517
Europa	2000	720	51,3	304	22,1	441	0,57	726
	2017	870	62,7	289	23,5	476	0,58	745
Oceanía	2000	51	5,4	27	3,1	38	0,15	31
	2017	71	6,4	33	3,2	70	0,20	41



Tabla 14: Evolución de la producción de cultivos y de carne (millones de t por año), la población (millones de habitantes), la superficie de cultivos (millones de ha), las emisiones de gases de efecto invernadero por la agricultura (Gigatons eq CO₂ por año), uso de fertilizantes (millones de t de N, P₂O₅ y K₂O) y de plaguicidas (miles t de p.a.) en los 5 continentes en 2000 y 2017. Elaborado sobre datos de FAO (2020), UN (2019), Aquastat (2019). 1 Gigaton = 10⁹ t.



Tabla 15: Datos por habitante de producción de cultivos y de carne, superficie bajo cultivos (Sup), extracciones de agua azul para agricultura (Ext), emisiones de gases de efecto invernadero (eq CO₂) por la agricultura (Emis), y uso de fertilizantes y de plaguicida. Datos correspondientes a valores promedio para el mundo y los 5 continentes en el año 2017, y expresados en toneladas, decímetros cúbicos, hectáreas o kilogramos por habitante. Elaborado sobre datos de FAO (2020), UN (2019), Aquastat (2019), IEA (2019).



	Cultivo	Carne	Ext	Sup	Emis	Fertiliz	Plag
	t hab ⁻¹	t hab ⁻¹	dam ³ hab ⁻¹	ha hab ⁻¹	t hab ⁻¹	t hab ⁻¹	kg hab ⁻¹
Mundo	0,83	0,044	0,38	0,21	0,72	0,025	0,55
África	0,58	0,016	0,16	0,22	0,76	0,005	0,06
América	1,46	0,104	0,42	0,37	1,35	0,050	1,33
Asia	0,70	0,031	0,49	0,13	0,52	0,024	0,48
Europa	1,17	0,084	0,09	0,39	0,78	0,032	0,64
Oceanía	1,73	0,156	0,33	0,81	4,78	0,077	1,70

Cálculos a partir de los datos contenidos en la Tabla 14 indican que la producción de cultivos por unidad de superficie de tierra, de agua azul utilizada, de energía consumida, de plaguicidas aplicados, y de gases de efecto invernadero emitidos ha crecido en las últimas dos décadas a nivel global y para los continentes en general. Lo mismo ocurrió, aunque en menor medida y con algunas excepciones, para la producción por unidad de fertilizante utilizado. Estos resultados significan que los recursos y los insumos se están utilizando de manera más eficiente.

Sin embargo, los procesos de contaminación tienen que ver con las cantidades totales utilizadas. Como ya se indicó, los volúmenes de fertilizantes y de plaguicidas aplicados globalmente continuaron creciendo este siglo al igual que las emisiones de GEI de la agricultura (Figura 59).

La cantidad de N₂ extraído de la atmósfera para la síntesis de fertilizante sobrepasó ampliamente el umbral de seguridad planetaria, sin que se observen cambios en la tendencia de uso. Es más, se marca la necesidad de incrementar su uso en las regiones que más deben cerrar sus brechas de rendimiento para satisfacer futuras necesidades (Van Ittersum *et al.*, 2019; Ten Berge *et al.*, 2019) o en las que se requiere reponer las extracciones de nutrientes (Sainz Rozas *et al.*, 2011).

Se puede progresar en el objetivo de sustituir insumos de síntesis química, aunque no es una tarea fácil dado el rol que cumplen en los sistemas agropecuarios actuales (Sección 5.2.2.3). Las proyecciones de expansión de la producción (Tabla 4) complican aún más la situación. Es altamente necesario encontrar las maneras de nutrir y proteger los cultivos reduciendo el uso de los productos de síntesis química y aumentando su eficiencia de utilización mediante los conceptos y las tecnologías indicadas en la Sección 5.2.2.4. Las eficiencias de utilización de estos productos son generalmente bajas (Lassaleta *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015; Fernández Quintanilla, 2015). Asimismo, la reducción de pérdidas y

desperdicios y la moderación de la dieta facilitan la tarea (Figuras 57 y 58; Muller *et al.*, 2017; Alexander *et al.*, 2019).

La producción agropecuaria, una de las principales actividades humanas, tiene una alta responsabilidad en el impacto ambiental global, ya que es el destino de la mayor parte de las deforestaciones, origina junto con el cambio de uso de la tierra el 23 % de las emisiones de GEI, utiliza el 70 % de las extracciones de agua azul, es causal de la contaminación con agroquímicos, y ocupa un alto porcentaje de la superficie de tierras libres de hielo (cultivos y ganadería). Como tal, la agricultura ha ejercido presión sobre el medioambiente comprometiendo los recursos y la futura producción de alimentos en cantidad y calidad.

Como hemos visto, algunos de los indicadores analizados muestran tendencias a mejorar, pero la mayoría no. Esto debe incentivarnos a redoblar nuestros esfuerzos para alcanzar las metas indicadas, que por ahora están distantes.

La pérdida de hábitats naturales, la alta dependencia de insumos, la contaminación, la degradación de suelos, en síntesis, la pérdida de servicios ecosistémicos, constituyen problemas que requieren soluciones.

Para garantizar una producción sostenida es necesario regular las demandas y romper la estrecha asociación hasta hoy existente entre producción e impacto ambiental; no tenemos alternativa. En otras palabras, el gran desafío consiste en alcanzar las metas en cuanto a producción agrícola hacia el 2050 evitando traspasar los límites que garantizan un uso seguro del planeta (Rockström *et al.*, 2009a; Godfray *et al.*, 2010; Nature, 2010; UNEP, 2014; Ripple, 2017; Springmann *et al.*, 2018; Lancet Commissions, 2019; IPCC, 2019a; Rockström *et al.*, 2020). Tal como fuera indicado, este desafío difiere en magnitud y vías de solución entre las distintas regiones.

De los capítulos anteriores surgen las estrategias que podemos utilizar en cuanto a la demanda y oferta de productos agrícolas para aportar al objetivo de reducir la huella ecológica a valores equiparables con la capacidad bioproductiva del planeta (Figura 61, Rockström *et al.*, 2009a).

Estas incluyen i) morigerar nuestras demandas dietarias y de biocombustibles, ii) limitar las pérdidas, desperdicios y la producción de desechos, iii) incrementar los rendimientos y aumentar la productividad de recursos e insumos a través del mejoramiento genético, la biotecnología, el manejo de los cultivos, las buenas prácticas agrícolas, y los cultivos múltiples, iv) reducir el uso de plaguicidas con técnicas de manejo integrado de organismos perjudiciales y con las novedosas tecnologías duras, v) disminuir la utilización de fertilizantes utilizando los nutrientes más eficien-

temente y aprovechando más los procesos de recirculación y fijación biológica de nitrógeno, vi) frenar la degradación de tierras con técnicas de agricultura conservacionista y promover su recuperación, vii) proteger los hábitats y los suministros de agua dulce, viii) incrementar la eficiencia de captura y uso del agua verde y la productividad del agua azul, recurso cada vez más limitante, ix) frenar la deforestación y preservar la biodiversidad, x) mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero de la agricultura incrementando el secuestro de carbono en los suelos y en la biomasa y limitando la deforestación, entre otras acciones.

Tradicionalmente, la intensificación se asocia con agricultura que causa mayor daño ambiental. No obstante, tal como ya fuera indicado, mayor producción agrícola y mejores servicios ecosistémicos no necesariamente son mutuamente excluyentes. Puede existir compatibilidad entre sostenibilidad e intensificación (Pretty *et al.*, 2018; Fernández *et al.*, 2019) a través de tecnologías basadas en conocimientos y procesos y tecnologías duras que propicien mejor uso de los recursos e insumos, reducción del uso de insumos externos de síntesis química, rediseño de los sistemas de producción y mirada de paisaje (Pretty *et al.*, 2018; Tiftonell *et al.*, 2016).

Conocemos distintas aproximaciones para cumplir con los objetivos referidos a una mayor productividad de recursos e insumos y a la sustitución de insumos de síntesis química y de prácticas perjudiciales para el ambiente. Para alcanzar la sostenibilidad, se necesita también del rediseño de los sistemas productivos y de la mirada de paisaje, basados en el aprovechamiento de diferentes procesos e interacciones ecológicas que contribuyan a aliviar o eliminar los problemas aún presentes en las aproximaciones de eficiencia y sustitución (Tiftonell *et al.*, 2016; Pretty *et al.*, 2018; Arístide, 2019).

Existen iniciativas que ejemplifican progresos en pos de los objetivos mencionados.

En China, Cui *et al.* (2018) informaron importantes logros en reducción de contaminación ambiental y en sostenibilidad de la producción a través de un uso más eficiente de la fertilización nitrogenada que involucra a muchos millones de productores. En Argentina, desde comienzos del presente siglo, la producción agrícola extensiva ha mostrado ciertos signos de transición hacia sistemas más sostenibles. Algunas de las prácticas que se están adoptando con este fin son i) mayor frecuencia de gramíneas en las rotaciones, ii) mayor proporción de doble cultivos, iii) cultivos de cobertura para control de malezas y aporte de nitrógeno o de carbono al suelo, iv) agricultura por ambiente y de precisión, v) manejo de cultivos con base ecofisiológica y ecológica, vi) mejores métodos de diagnóstico y buenas prácticas en el uso de fertilizantes, vii) aplicación dirigida al blanco de herbicidas que posibilita importantes ahorros

de producto, viii) uso de productos menos tóxicos y menos persistentes (Satorre y Andrade, 2020; Satorre, 2020).

En Balcarce y Paraná (Argentina), desde hace 10 años se conducen ensayos en los cuales se analizan de manera holística los efectos de un manejo intensificado en conocimientos y procesos en comparación con el sistema testigo difundido para la rotación maíz-soja-trigo bajo siembra directa. El manejo intensificado consiste en la integración de una serie de prácticas previamente evaluadas en ensayos reduccionistas con el objetivo de cerrar brechas de producción, aumentar la productividad de recursos e insumos y reducir el impacto ambiental.

Las tecnologías y prácticas utilizadas en el sistema intensificado son: cálculo del rendimiento objetivo basado en la estimación de los potenciales de secano (Yw), análisis de suelo y diagnóstico de requerimiento de nutrientes, elección de cultivares con potencialidad y estabilidad de rendimiento frente a adversidades bióticas y abióticas, aplicaciones de fertilizantes más sincronizadas con las demandas del cultivo, adecuación del manejo del cultivo para mayor recuperación de nutrientes y para competir mejor con las malezas, monitoreo de adversidades bióticas y utilización de umbrales de daño para su control, cultivos de cobertura para controlar malezas y aportar N y C al suelo. En ambos manejos se monitorean la presencia de plaguicidas en suelo y agua, las emisiones de gases de efecto invernadero, y las propiedades del suelo.

Los resultados muestran que la producción de granos de la secuencia del sistema intensificado superó al sistema testigo en alrededor de 25 %, dependiendo de las condiciones ambientales, lo que se reflejó en mejores márgenes económicos. La productividad del agua y de la radiación también fueron mayores en el sistema intensificado que en el testigo (26 % y 17 %, respectivamente) debido, principalmente, a aumentos en la eficiencia de uso de radiación solar interceptada y de agua evapotranspirada. Esto se debió a la fertilización, los mejores cultivares, y las mejores prácticas de manejo, entre otras razones. Además, a pesar de una mayor dosis de fertilización nitrogenada, la eficiencia de utilización del N absorbido fue 15 % superior en el sistema intensificado. En aspectos ambientales, el tratamiento intensificado sostenible redujo 26 % las emisiones de N₂O por unidad de rendimiento de la secuencia y 20 % las emisiones absolutas del maíz. El sistema intensificado incrementó además el rendimiento en energía y en proteína por unidad de N₂O emitido. También se logró un 90 % de disminución de presencia de malezas en respuesta a la utilización de cultivos de cobertura, que resultó en ahorros de número de aplicaciones de herbicidas y de dosis, y en un aumento de alrededor de 40 % en el rendimiento por unidad de glifosato aplicado. Finalmente, este sistema innovador resultó en un leve incremento en el contenido de carbono en

el suelo por los mayores aportes de biomasa de los cultivos y de los cultivos de cobertura (Rizzalli com. personal). Algunos resultados parciales de estas investigaciones se presentaron en Caviglia *et al.* (2019); Casanave Ponti (2021) y Casanave Ponti *et al.* (2020).

Los logros indicados en los párrafos anteriores son importantes, pero no suficientes. La información que surge del monitoreo ambiental y del análisis de productividad es fundamental para conocer el nivel de transición alcanzado y para analizar los pasos para seguir. Es necesario continuar mejorando la productividad de recursos e insumos, profundizar el proceso de sustitución de insumos externos de síntesis química y de prácticas perjudiciales para el ambiente y avanzar en el rediseño del sistema, buscando mejores rotaciones y mayor diversidad (Agosti *et al.*, 2020), aprovechando la fijación biológica de nitrógeno (Postgate, 1998), recirculando nutrientes (Zhang *et al.*, 2019) y utilizando enemigos naturales (Tulli *et al.*, 2017), microorganismos benéficos (Cano, 2011) y cultivos de servicio (Piñeiro, 2014), entre otras prácticas. En relación con este tema, Pretty *et al.* (2018) definen niveles de transición alcanzados en distintos casos de intensificación sostenible en el mundo. Además, existen ejemplos documentados de aplicación de técnicas agroecológicas y de intensificación ecológica (Tiftonell, 2014; Aparicio *et al.*, 2018).

La información presentada a lo largo del libro muestra que se puede romper la relación directa entre producción y degradación ambiental hasta hoy existente, aunque como fuera demostrado, el reto difiere entre continentes. Los diferentes caminos hacia la intensificación sostenible, en tanto manifiestan una preocupación por la producción y los impactos ambientales, tienden a la complementación y a la convergencia.

Es importante considerar que propuestas que atienden los efectos ambientales pero que descuidan las metas productivas produciendo caídas de los volúmenes cosechados resultarían en un incremento de los precios internacionales de los alimentos, lo que en el contexto actual atenta contra la seguridad alimentaria de la población de muchos países (De Janvry, 2010).

Las aproximaciones pueden ser distintas y seguramente complementarias, pero requerirán esfuerzos integrados de especialistas de distintas disciplinas y de los distintos actores involucrados en el medio productivo. En este contexto, se insiste en que toda tecnología debe ser considerada y evaluada con rigor científico en función de sus potenciales aportes a los objetivos de una producción sostenible.

Algunas de las técnicas de producción sostenible descriptas son accesibles y económicamente favorables para el productor. En caso contrario, la investigación y el desarrollo pueden abaratar-

las y tornarlas más factibles. La adopción se favorece si una parte importante de los excedentes logrados por la utilización de dichas tecnologías son apropiables por el productor. Esto es lo que generalmente acontece en el caso de las tecnologías de procesos relacionadas con el manejo del suelo, los cultivos, las rotaciones y las plagas. No obstante, como muchas de ellas requieren mayores conocimientos y habilidades para su aplicación, se precisan acciones de formación y capacitación de productores, asesores y otros actores. La adopción de las tecnologías de producción sostenible también se promueve si se establecen barreras paraarancelarias en el comercio mundial para la agricultura que no contempla las externalidades negativas. Si las técnicas precisan mayor esfuerzo y dedicación para su implementación (no completamente gratificados por los resultados económicos) o resultan más caras, se requerirán incentivos o regulaciones que las promuevan siempre que las externalidades lo justifiquen. Dichas políticas del estado son necesarias, además, porque los daños pueden ser irreversibles cuando el productor percibe menores ingresos a causa del impacto ambiental. Pero sin lugar a dudas, lo más importante para alcanzar una producción sostenible es el compromiso social-ambiental de los productores y de la población en general (Raskin *et al.*, 2002), aspecto en el cual la educación y los cambios culturales cumplen un rol fundamental.

Para alcanzar el objetivo de producir los alimentos necesarios para el 2050 reduciendo a la vez el impacto ambiental se deben realizar las inversiones necesarias en investigación, extensión y desarrollo agropecuario y tomar medidas políticas adecuadas (Sadras *et al.*, 2020). Contrariamente a lo deseable, la inversión en investigación y desarrollo agrícola se reduce o se mantiene en el mundo, con pocas excepciones (Pardey y Pingali, 2010; Pardey *et al.*, 2013; Heisey y Fuglie, 2018). Muchos países, sobre todo los menos desarrollados, necesitan resolver serios problemas de infraestructura y de capacitación de los productores y desarrollar proyectos de recuperación de suelos degradados. Los organismos internacionales hacen importantes aportes, sobre todo en aquellos casos en los que los países no pueden aún desarrollar sus propios programas de mejora (Rosyara *et al.*, 2019).

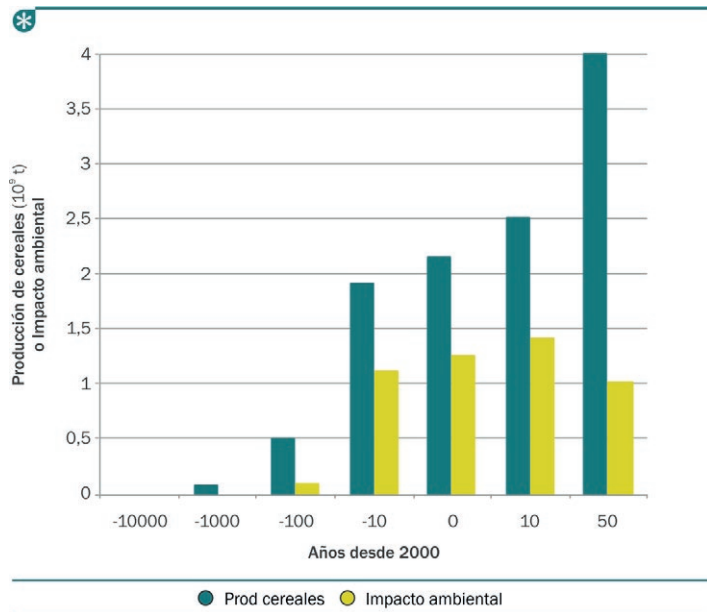
Hasta aquí, se evaluaron los efectos ambientales de la agricultura. El problema que enfrentamos, sin embargo, trasciende dicho ámbito. Las otras actividades humanas, como la industria, el transporte y las domésticas, también generan daños al ambiente que a la vez comprometen la producción de alimentos. En la próxima sección se analiza la evolución reciente de variables que reflejan todas las actividades humanas. Se avanza, además, en el análisis a nivel de los continentes, y se proponen y discuten acciones para la solución de los problemas identificados.

6.2.2. Las actividades humanas y sus efectos ambientales

La huella ecológica, entendida como la cantidad de planetas Tierra necesarios para producir lo que consumimos y disponer de los desechos que generamos, considerando todas las actividades humanas, (Wackernagel y Rees, 1996) creció en las últimas décadas superando la capacidad bioproductiva del planeta (Figura 61).

Los datos de la Figura 61 muestran las metas para alcanzar entre los años 2010 y 2050 y corresponden a la primera edición de este libro (Andrade, 2016a). ¿Cómo es la situación actual? ¿Hemos comenzado a transitar la dirección correcta?

Figura 61: Producción de cereales (barras verdes) e índice de impacto ambiental (barras amarillas) desde el origen de la agricultura hasta el 2050. El índice de impacto ambiental se considera como la cantidad de planetas Tierra necesarios para producir lo que consumimos y disponer de los desechos que generamos. El objetivo a futuro es lograr un índice de impacto ambiental no mayor a 1. Datos ambientales según Wackernagel y Rees (1996). Datos de producción estimados según modelo lineal de Figura 12 (1990-2010) y según población y consumo de cereales *per cápita* (1900 y anteriores). Se estimó una producción de 4.000 millones de t de cereales al 2050 (Tester y Landrige, 2010).



La producción de cereales y de alimentos continuó la tendencia indicada en la figura (Hunter *et al.*, 2017). Contrariamente, con respecto al impacto ambiental de nuestras actividades, no hemos logrado revertir la tendencia. La huella ecológica actual ronda 1,7 planetas Tierra. Las emisiones de gases de efecto invernadero se sostienen, el aumento de la temperatura global no muestra signos de desaceleración, el ascenso del nivel del mar se acelera, la incidencia de eventos extremos crece, la degradación de suelos y la desertización continúan, los residuos se acumulan, el uso de energía y productos contaminantes no decrece, la deforestación de bosques primarios se reactivó en los últimos años, y la pérdida de biodiversidad continúa a ritmo alarmante (Capítulo 3). Claramente, no estamos en la trayectoria correcta sugerida en la Figura 61.

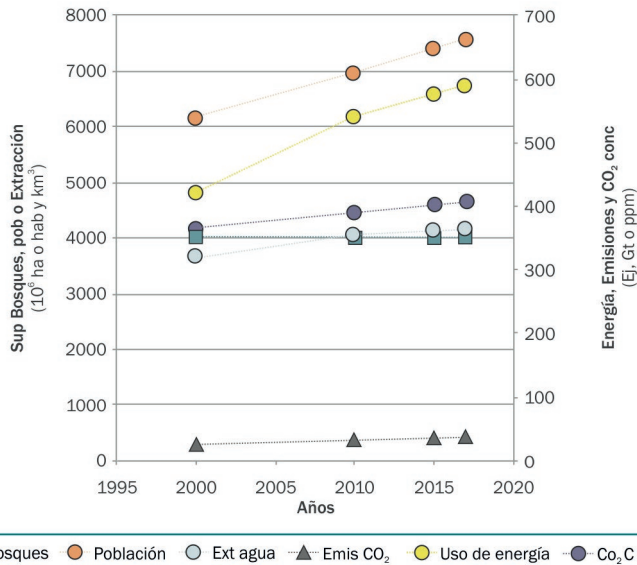


Figura 62: Evolución de la superficie de bosques, el suministro total anual de energía primaria, las emisiones totales anuales de CO₂ por quema de combustibles fósiles, la extracción total anual de agua azul, la concentración de CO₂ en la atmósfera y la población en el mundo desde 2000 a 2017. Datos expresados en millones de ha de bosques, millones de habitantes, km³ de extracción de agua azul, Exajoules (Ej) de energía, Gigatons (Gt) de CO₂ y ppm de CO₂. 1 Ej = 10¹⁸ J; 1 Gt = 10⁹ t. Elaborado a partir de datos de FAO (2020), UN (2019), Aquastat (2019), IEA (2019). El uso de energía corresponde a los datos de suministro total primario que representa la suma de la producción más las importaciones menos las exportaciones y los cambios de stocks.

En un análisis global de la situación ambiental en los últimos años, que trasciende lo agropecuario, se incluyeron variables como emisiones totales por quema de combustibles fósiles, extracciones de agua para todos los usos, concentración de CO₂ en la atmósfera como indicadora del calentamiento global, superficie de bosques (indicadora de biodiversidad y de otros servicios ecosistémicos), y suministro total de energía primaria (Figura 62). Las tendencias de estas variables indican que, en lo que va del siglo, las metas ambientales establecidas para el año 2050 (Andrade, 2016a) no se están cumpliendo.

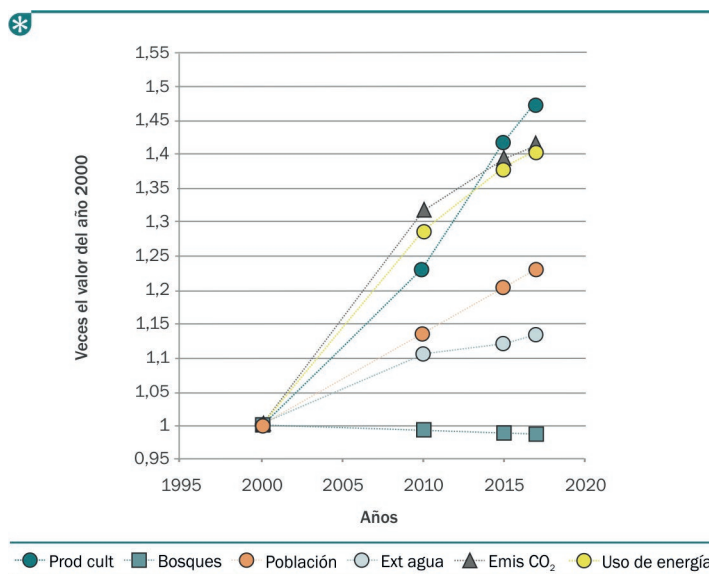
El suministro total de energía primaria, las emisiones totales por quema de combustibles fósiles y las extracciones totales de agua azul aumentaron en el mundo durante este siglo (Figura 62). Estas variables, salvo la extracción de agua azul, crecieron en mayor proporción que la población (Figura 63), resultando en mayores valores por habitante (Figura 64). Además, la superficie mundial de bosques se redujo, por lo que la disponibilidad de estos por habitante se redujo aún más, de 0,66 a 0,53 ha por persona (Figura 64).

A nivel global, el suministro de energía se asocia estrechamente con las emisiones de CO₂ ($R^2=0,99$) y, por lo tanto, con la concentración de este gas en la atmósfera. Estos procesos o variables no mostraron reducción, por lo que sus efectos negativos resultantes (incremento de la temperatura, eventos extremos, desertización, subida del nivel del mar) continúan intensificándose.

La concentración de CO₂ en la atmósfera, indicador de cambio climático, subió de 369 a 410 ppm del 2000 a la actualidad y continúa creciendo con tasas récords en los últimos años. Esta variable excedió el umbral de seguridad indicado por Rockström (Tabla 1; Figura 14), lo que remarca la necesidad de mitigar las emisiones de GEI, principalmente, a través del uso de energías renovables limpias.

Las extracciones totales de agua azul aumentaron a menores tasas a partir de 2010 (Figura 62). La cantidad extraída por habitante se redujo este siglo (Figura 64), reflejando problemas moderados y severos de escasez que afectan a un número creciente de personas en varios países.

Figura 63: Evolución de valores anuales relativos a los correspondientes al año 2000 de producción de cultivos, población, superficie de bosques, suministro total de energía primaria, emisiones totales de CO₂ por quema de combustibles fósiles, y extracción total de agua azul en el mundo desde 2000 a 2017. Datos derivados de la Figura 62. Elaborado sobre datos de FAO (2020), UN (2019), Aquastat (2019), IEA (2019).



La disminución observada de superficie global de bosques (Figura 62) se debe mayormente al incremento de la superficie agrícola y se asocia con las pérdidas de biodiversidad. Esta última variable ha excedido el umbral de seguridad indicado en la Tabla 1, y es un problema que continúa agravándose en el presente siglo. La tasa de reducción de superficie de bosques es menor que la experimentada en la última década del siglo anterior, y si bien se redujo significativamente alrededor de la primera década del siglo XXI, volvió a crecer recientemente (Sección 3.2).

Los datos indican que la situación continúa empeorando. Estamos, entonces, utilizando recursos a una tasa mayor a la de su regeneración, especialmente en los países desarrollados (GFW, 2019). Es necesario buscar alternativas de producción, consumo

y utilización de materiales, bienes y servicios más sostenibles que las actuales para evitar graves consecuencias para la humanidad.

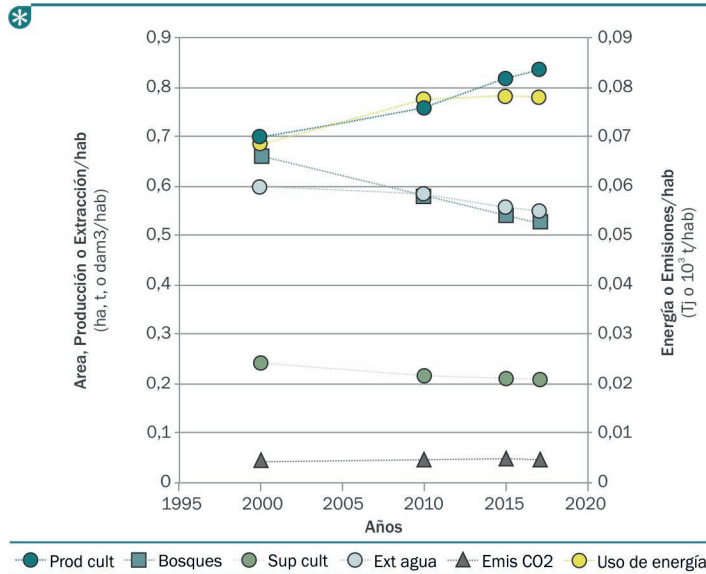


Figura 64: Valores promedio por habitante de producción anual de cultivos, superficie de cultivos y de bosques, suministro anual de energía primaria, emisiones anuales de CO₂ por quema de combustibles fósiles, y extracción anual de agua azul en el mundo desde 2000 a 2017. Datos por habitante expresados en toneladas de producto vegetal, ha de cultivo y de bosques, dam³ de extracción de agua azul, Terajoules (Tj) de energía y miles t de CO₂. 1 Tj = 10¹² j. Elaborado sobre datos de FAO (2020), UN (2019), Aquastat (2019), IEA (2019).

	África	América	Asia	Europa	Oceanía
	%				
Sup. cultivo	8	1.8	4.8	-1	18
Energía	19	0	22	-5	0.3
Ext. agua	8.4	-3	6	-10	5
Sup. bosque	-2.2	-0.6	0.7	0.2	0.9
Población	20	7	7	1	11

Tabla 16: Cambio porcentual de superficie de cultivo, suministro anual de energía primaria, extracciones anuales totales de agua azul, superficie de bosques y población entre 2010 y 2017 para los continentes África, América, Asia, Europa y Oceanía. Elaborado a partir de datos de FAO (2020), UN (2019), Aquastat 2019), IEA (2019).

El análisis a nivel de continentes de la evolución de estas variables en los últimos años revela importantes contrastes (Tabla 16). El suministro total de energía primaria aumentó 3 veces más que la población en Asia, creció en proporción similar al número de habitantes en África, se mantuvo en América y Oceanía a pesar del crecimiento poblacional, y se redujo en Europa en cantidad total y por habitante. Las extracciones de agua total se redujeron en América y en Europa, aumentaron en Asia en una proporción parecida a la de la población y también en África y Oceanía, aunque relativamente menos que su crecimiento demográfico. La superficie de cultivo decreció en Europa y se extendió marcadamente en Oceanía. En el resto de los continentes, la tierra bajo cultivos aumentó, pero en menor proporción que el crecimiento en la cantidad de habitantes. Finalmente, la superficie total de bosques,

indicadora de biodiversidad y de otros servicios ecosistémicos, se redujo en África y América (continentes con mayor superficie de bosques), pero se expandió en Asia, Europa y Oceanía.

La producción de alimentos, la disponibilidad de energía y la extracción de agua azul, expresados por persona y por año, son substancialmente inferiores para el continente africano (especialmente África subsahariana) que para el resto del mundo, y son máximas para América (especialmente América del Norte) (Tabla 17). Europa también muestra altos valores, salvo para extracciones de agua. Finalmente, Asia presenta moderados a bajos niveles de producción de cultivo y suministro de energía y altos de extracciones de agua por habitante.

Tabla 17: Producción de cultivos, extracciones totales de agua azul, y suministro de energía primaria por habitante y por año para el mundo, África, América, Asia y Europa. Datos promedio correspondientes al año 2017 y expresados en toneladas, decímetros cúbicos y Terajoules por habitante y por año. 1 Tj = 10¹² J. Elaborado con datos de FAO (2020), UN (2019), Aquastat (2019), IEA (2019). El uso de energía se asocia estrechamente con las emisiones CO₂.

	Prod. cultivos	Ext. Agua	Energía 1.º
	t hab ⁻¹	dam ³ hab ⁻¹	Tj hab ⁻¹
Mundo	0,834	0,549	0,078
África	0,577	0,193	0,027
América	1,457	0,828	0,137
Asia	0,705	0,608	0,046
Europa	1,168	0,411	0,112

Existen, a su vez, importantes variaciones entre países dentro de cada continente y dentro de cada país, que ponen en evidencia la gran disparidad en utilización de recursos y consumo y reflejan la tensión existente entre desarrollo y explotación de los recursos. Estos puntos se abordan con más detalle en la Sección 6.3.

La Figura 65 presenta una integración simplificada de los desafíos productivos y ambientales que enfrentamos.

La demanda de alimentos, biocombustibles y fibra tracciona la producción agropecuaria (Figura 65a). La regulación de esta demanda a través de la moderación de la dieta y de la reducción de pérdidas y desperdicios aporta considerablemente a la disminución de la cantidad de alimentos futuros necesarios (Figuras 57 y 58). La producción agropecuaria, a su vez, ejerce presión sobre el medioambiente (Figura 65b) ya que i) es causal de la mayor parte de las deforestaciones, de alrededor de un cuarto de las emisiones de GEI, y de procesos de contaminación con agroquímicos, ii) ocupa alrededor de la mitad de la superficie de tierras libres de hielo con las consecuentes degradaciones de los suelos, y iii) es el destino de la mayor parte de las extracciones de agua azul. Todos estos efectos fueron detalladamente descritos en el Capítulo 3.

Las otras actividades humanas, como la industria, el transporte y las domésticas, también ejercen gran presión sobre el ambiente,

principalmente a través del cambio climático (Figura 65c) por ser responsables de las tres cuartas partes de las emisiones de gases de efecto invernadero. La industria y la minería también producen deterioro de hábitats y contaminación.

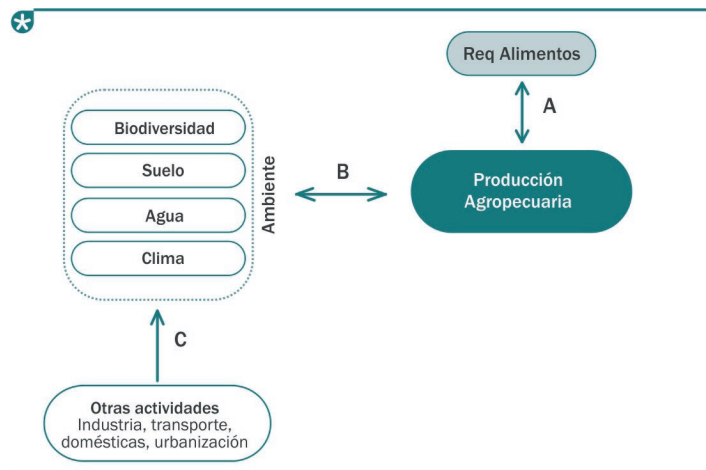


Figura 65: Esquema general de las relaciones existentes entre demanda de productos agrícolas, el consumo de otros bienes y servicios, el ambiente y la producción agropecuaria (Ripple *et al.*, 2017; Vos y Belu, 2019; IPCC, 2019a, IPBES, 2019; Lancet Commissions, 2019).

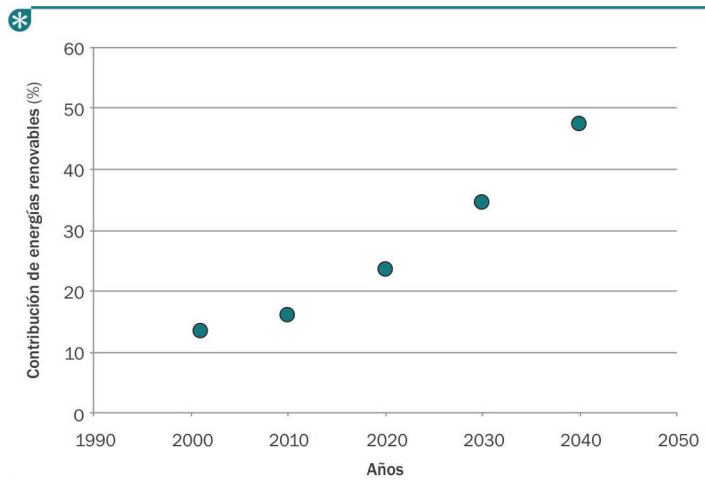
En procesos que incluyen retrocontroles negativos, el deterioro ambiental en todas sus formas compromete la producción agropecuaria y la futura seguridad alimentaria (Figura 65b). El ascenso de la temperatura, la elevación del nivel del mar, los eventos extremos cada vez más frecuentes, el aumento de la variabilidad climática, el deterioro de los suelos, la desertificación, la pérdida de biodiversidad, los excesos hídricos, entre otros procesos, tienen importantes efectos sobre la producción agropecuaria en cantidad y calidad, tal como fuera explicitado en capítulos previos. Los aspectos más álgidos de estos efectos negativos a nivel global son el avance de la desertización en el Sahel y la subida del nivel del mar en Bangladesh.

La seguridad alimentaria futura está amenazada entonces por el cambio climático y la degradación ambiental, sobre todo en regiones menos desarrolladas. La gravedad de la situación exige cambios profundos y rápidos.

En las Secciones 5.2.1 y 5.2.2.4 se presentaron y analizaron las tecnologías que conducen a satisfacer las demandas de productos agrícolas, reduciendo paralelamente el impacto ambiental, es decir, producir de manera sostenible.

Dados los importantes efectos de las otras actividades humanas en el calentamiento global y en el ambiente en general, es necesario moderar y regular las demandas de energía, materiales, bienes y otros servicios, utilizar fuentes de energía renovable y limpia, y hacer un uso más eficiente de estos recursos.

Figura 66: Evolución de la contribución de energías renovables al consumo global de energía de 2000 a 2040. Datos extraídos de Panwar *et al.* (2011).



El crecimiento en el uso de combustibles fósiles, las emisiones de CO₂ y la concentración de esta molécula en atmósfera son variables relacionadas causalmente entre sí y con el calentamiento global (Sección 3.1), por lo que se enfatiza la necesidad de cambiar la matriz energética, incrementando el uso de formas renovables y limpias.

Las fuentes de energía renovable, en las cuales la tasa de utilización es similar a la de generación, son una opción factible y segura para todos los países (Lund, 2007). Del consumo global de energía en el año 2017, los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) aportaron el 79,7 %, la fisión nuclear el 2,2 % y las energías renovables el 18,1 % (REN 21, 2019). Las renovables modernas, que incluyen hidroeléctrica, eólica, solar, biocombustibles, biomasa y geotérmica, aportaron el 10,6 %; mientras que la biomasa tradicional (leña) brindó el 7,5 %. Las contribuciones de estas fuentes renovables crecen año a año, pero son bajas en función de las proyecciones realizadas tiempo atrás (Panwar *et al.*, 2011; IEA, 2019; Figura 66). No obstante, la transición está ocurriendo y se esperan importantes aportes hacia mediados del presente siglo.

Las energías renovables son actualmente una fuente importante para la generación de electricidad a nivel global. Se estima que su contribución a la producción total mundial de electricidad fue mayor al 26 % hacia fines del año 2018 (REN 21, 2019).

Las principales energías renovables modernas son las derivadas de los biocombustibles, la hidroeléctrica, la eólica y la solar (térmica y fotovoltaica). La eólica y la solar están recibiendo mayor atención en los últimos años. El suministro total de energía aumentó casi 9 % entre 2010 y 2017, mientras que los de energía solar y eólica se incrementaron 133 %. A fines del año 2018, el po-

der instalado fue de 505 y 591 GW para la fotovoltaica y la eólica, respectivamente (Balzani, 2019). La fotovoltaica es especialmente promisoría ya que aumenta a una alta tasa (25 % por año). Algunos estiman que para el año 2050 se transformará en una de las fuentes de energía más importantes de la humanidad. Este proceso convierte la radiación solar en electricidad con una eficiencia de 20 %, valor muy superior al de la fotosíntesis natural. Además de eficiente es escalable, duradera, barata y confiable, y puede utilizarse en todo lugar (Balzani, 2019; Michl, 2019). Un cuadrado de paneles fotovoltaicos de pocos cientos de km de lado satisfaría los requerimientos globales actuales. Existen otras fuentes renovables como la geotérmica, las mareas y las olas, pero su contribución actual es de menor magnitud.

Otra fuente prometedora es la fusión nuclear en la que por ejemplo deuterio y tritio (isótopos de hidrógeno) se fusionan generando helio, un neutrón y energía (17,5 MeV) a través de la conversión de una pequeña fracción de la masa involucrada de acuerdo a la fórmula $E=mc^2$. Es una reacción con insumos prácticamente inagotables, muy segura y con baja producción de residuos (Kikuchi *et al.*, 2012). Requiere, sin embargo, calentar el gas a elevadísimas temperaturas para vencer las fuerzas de repulsión electrostática de los núcleos, y permitir así su fusión y la liberación de energía. Este proceso presenta difíciles problemas técnicos, como la falta de materiales que resistan dichas temperaturas. No obstante, estos pueden ser zanjados con potentes campos magnéticos para confinar y comprimir el plasma y proveer aislamiento térmico. Diversos grupos de investigación están trabajando para que en las próximas décadas tengamos reactores funcionando con balances favorables y aportando a las redes de consumo.

El sol es la fuente de vida en nuestro planeta. Todas las civilizaciones pasadas dependieron de su energía para nutrirse, vestirse, calentar los hogares, alimentar a los animales de tiro y obtener movimiento mecánico (Smil, 2013). Los alimentos de origen vegetal y animal, la leña, la fibra, los flujos de viento y de agua que movían los molinos, todos dependían o provenían directa o indirectamente de la radiación solar que incidía sobre nuestro planeta. Posteriormente, luego de la revolución industrial, el petróleo y el carbón se convirtieron en las principales fuentes de energía. Estos también provienen del sol, ya que derivan de desechos orgánicos producidos por la conversión de radiación solar en biomasa en tiempos remotos.

Hoy estamos aprendiendo a utilizar más directamente, y por lo tanto más eficientemente, la radiación solar que recibimos y los vientos que el calentamiento diferencial de la atmósfera genera. Los progresos en calefacción solar, energía fotovoltaica, térmica

y eólica son claros ejemplos (Balzani, 2019). Además, en el futuro podremos reproducir y controlar reacciones de fusión nuclear similares a las que se producen en el interior del sol y la reacción de fotosíntesis para generar energía y alimentos de manera más sostenible.

Muchos de los problemas que hoy enfrentamos, como el calentamiento global, el cambio climático, el déficit energético, la escasez de agua dulce, y el agotamiento de fertilizantes, entre otros, se aliviarían sensiblemente ante una abundante disponibilidad de energía barata y limpia. Para cubrir las futuras necesidades y reducir paralelamente los efectos ambientales adversos se requiere disponer de tecnologías productivas y energéticas amigables con el ambiente, utilizar más eficientemente los recursos, la energía, los alimentos, los materiales y otros bienes y servicios, y disminuir las demandas superfluas, o sea, métodos de producción y hábitos de consumo sostenibles (Raskin *et al.*, 2002; Ripple *et al.*, 2017; Lancet Commissions, 2019; Balzani, 2019).

Utilizar la energía y los materiales más eficientemente incluye i) mejorar la eficiencia de uso de energía en los vehículos, en el transporte público y comercial, y en la calefacción, refrigeración e iluminación de hogares, fábricas, comercios y edificios públicos, ii) diseñar plantas energéticas más eficientes, iii) conformar redes inalámbricas y almacenamiento de información eficientes y iv) reemplazar materiales por otros con menor costo ambiental, como por ejemplo el papel por bits o artículos de madera por otros elaborados a partir de materiales reciclados (Smil, 2017).

La moderación del consumo es también un factor relevante. En este aspecto, el teletrabajo y la reducción de la distancia al lugar de empleo y de consumos ostentosos e innecesarios ahorran materiales y energía y reducen emisiones de GEI. La acumulación de residuos de todo tipo refleja una sociedad de consumo y de excesos con poca capacidad de gestión de los mismos. Los recursos del planeta son limitados y no podemos mantener el actual ritmo de utilización. Debemos desalentar consumos excesivos y fomentar la reutilización, el reciclaje y la bioconversión de desechos y residuos.

Las tecnologías indicadas no serían suficientes para alcanzar las metas fijadas para este siglo en cuanto al calentamiento global, por lo que se necesita, además, remover CO₂ de la atmósfera. La bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS) es una posible solución a la que se le suma el secuestro de carbono en suelos y en biomasa indicado en la Sección 5.2.1. Las tecnologías BECCS están desarrolladas y su potencial de decarboxilación es alto (Consoli, 2019). No obstante, se deben contemplar los aspectos ambientales y de competencia con los alimentos que se indicaron en la sección de biocombustibles y biomateriales.

Finalmente, el agua es cada vez más escasa y limitante, por lo que se necesita una utilización más eficiente de este recurso. Para incrementar la disponibilidad de agua para otros usos relevantes (industria y doméstico) y reducir los efectos de las sequías agrícolas se requiere mejorar la eficiencia de riego y de captura de las precipitaciones y aumentar la eficiencia de uso del agua evapotranspirada por los cultivos (Hsiao *et al.*, 2007; Secciones 3.3 y 5.2.2.4). Además, la industria y las ciudades necesitan reducir demandas superfluas y encontrar maneras más eficientes de utilizar el agua azul y de tratar, purificar y reutilizar las aguas grises o negras (Hsiao *et al.*, 2007; Chartres y Varma, 2010).

Las acciones indicadas sobre moderar el consumo de bienes y servicios y utilizar eficientemente energías renovables y limpias contribuyen a disminuir el impacto ambiental y, por lo tanto, sus efectos negativos sobre la producción de alimentos.

6.2.3. Integración y síntesis

Algunas acciones o prácticas pueden tener beneficios en ciertos aspectos, pero perjuicios en otros. Es necesario conocer cómo cada una de ellas influye en la mitigación y adaptación frente al calentamiento global, la degradación de hábitats y suelos, la desertificación, la contaminación, los excesos hídricos, la escasez de agua, el ascenso del nivel del mar, la pérdida de biodiversidad, la seguridad alimentaria, etc. Además, cuanto más trepamos en la escala de complejidad, las interacciones se magnifican y el efecto de los factores individuales se atenúa.

¿Sabemos cuáles son los problemas más urgentes para la futura seguridad alimentaria? ¿Conocemos las interacciones, sinergias o compensaciones entre los distintos factores que la determinan? ¿Existen umbrales más críticos o problemas más difíciles de revertir? ¿Dimensionamos cuánto nos aproximamos a los puntos de no retorno? ¿Podemos identificar las prácticas más urgentes a implementar?

Para responder a estas preguntas es muy útil contar con modelos integrales que nos permitan evaluar cómo la implementación de diferentes prácticas y estrategias afectan las distintas variables de interés en relación con la situación ambiental y la seguridad alimentaria en el mediano y largo plazo. Con este tipo de modelos se puede, por ejemplo, sopesar a distintas escalas las ventajas y desventajas de la producción ganadera en tierras de cultivo, o los beneficios y problemas generados por las técnicas de insumos (Capítulo 3, Secciones 5.2.1; 5.2.2.3; 5.2.2.4). Estos modelos nos podrían indicar, además, la combinación espacial y temporal óptima de acciones, tanto a escala global como regional, para un futuro alimentario más sostenible.

Como un avance en esta dirección, el IPCC (2019a) presenta una estimación de la contribución potencial global de distintas estrategias agropecuarias de intervención a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, adaptación al cambio climático, desertificación, degradación de suelos, y seguridad alimentaria en forma conjunta. Este análisis multidimensional incluye la evaluación de los efectos positivos o negativos sobre las variables mencionadas de estrategias generales de manejo de cultivos, manejo de suelos, forestación y reforestación, producción animal, regulación de demandas, y uso de bioenergía, entre otras. Establece para cada caso la magnitud del efecto y su nivel de confianza, a través de una escala cualitativa definida por rangos de valores, separando además las estrategias y prácticas que compiten y no compiten por tierra. Esta aproximación permite acercarse al óptimo balance de los servicios ecosistémicos.

Con el mismo fin, el modelo Globiom (Valin *et al.*, 2013) fue diseñado para contribuir a la búsqueda de la manera de proveer alimentos al mundo de manera sostenible y al menor costo para distintos escenarios. Este optimiza la meta de alimentación de la humanidad de manera más eficiente desde el punto de vista económico, calculando las consecuencias ambientales y sociales a través de métodos iterativos. En la misma línea, Searchinger *et al.* (2018) utilizaron un modelo integrado para calcular las contribuciones de tipo, cantidad y procesos de producción de una hectárea de tierra a la capacidad global de secuestrar carbono y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Finalmente, Muller *et al.* (2017) emplearon un modelo multidimensional para analizar el papel que podría desempeñar la agricultura orgánica en los sistemas alimentarios sostenibles.

La información recopilada, integrada y presentada en este libro puede contribuir al desarrollo de estos modelos complejos.

En síntesis, las metas ambientales trazadas no se están alcanzando. Si bien algunas variables muestran ciertos signos positivos, como la reducción de la deforestación en algunas regiones, la desaceleración en el uso de plaguicidas y el aumento de uso de energías renovables, entre otros, en términos globales y generales no hemos logrado torcer la tendencia del impacto ambiental de las actividades agropecuarias y humanas. Resulta imperioso revertir el daño ambiental. En los capítulos anteriores se presentaron estrategias y prácticas que pueden contribuir a estos objetivos, sin desatender las metas productivas.

Para alcanzar una producción sostenible no se pueden soslayar aspectos relacionados con el contexto social actual (Kayal *et al.*, 2019). La definición de producción sostenible incluye la equidad y el desarrollo equilibrado de todos los territorios. La seguridad

alimentaria tiene cuatro aspectos centrales para considerar: la producción de alimentos, el uso que hacemos de los mismos, la sostenibilidad, y el acceso a los alimentos. Los tres primeros aspectos fueron tratados en los capítulos previos. El punto restante, el acceso, es un factor crucial para la seguridad alimentaria, que está a su vez asociado con la pobreza.

Con relación a estos temas, se presenta en el próximo capítulo un análisis a nivel mundial de la pobreza y de sus efectos sobre el desarrollo social, la desnutrición y el consumo.

6.3. La pobreza

El análisis realizado sobre la producción agrícola para satisfacer las futuras demandas y la necesidad de la reducción simultánea de los impactos ambientales negativos no contempla aspectos de distribución y de acceso a los alimentos, también cruciales para la sostenibilidad (Aristide, 2019). La ausencia de una adecuada nutrición se debe, mayormente, a la falta de acceso a los alimentos y esto es consecuencia de la pobreza, definida como la situación en la cual la persona no puede satisfacer sus necesidades básicas. En concordancia, Sen (1981) afirmó que las mayores hambrunas de la humanidad se debieron a causas socioeconómicas y a fallas de distribución y de medidas correctoras más que a reducciones en fuentes de alimentos.

Las cantidades de calorías y proteínas que se producen actualmente, a diferencia de lo que ocurría en 1960, son suficientes para nutrir adecuadamente a todos los habitantes del mundo; pero estas están mal distribuidas y se pierden o desperdician en altos porcentajes. Por un lado, hay desnutridos a causa de la pobreza, y por otro, excesos de consumo que generan problemas de sobrepeso y obesidad (Sección 5.1.1) con implicancias para la salud (Gordon *et al.*, 2017). Además, la pobreza impide el acceso a otras condiciones de desarrollo humano como la salud, la educación y el agua potable.

Lo dicho marca la relevancia de indagar acerca del poder adquisitivo de las personas y de su relación con las variables de desarrollo humano y las de consumo. También es necesario analizar las causas de la pobreza, así como los progresos que se han dado en las últimas décadas y los aspectos pendientes que merecen atención y solución.

6.3.1. Los ingresos y el desarrollo humano

El desarrollo humano se relaciona con la nutrición y la alimentación, la salud, la educación y el acceso a agua potable, entre otras variables. Todos estos componentes del desarrollo se asocian con

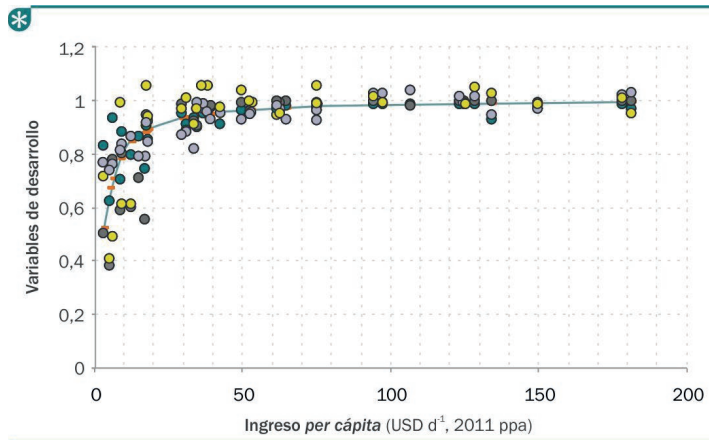


Figura 67: Relación entre variables de desarrollo humano e ingreso promedio *per cápita* por día. Los datos corresponden a valores de 36 países (indicados en la Figura 74a) representativos de los 5 continentes en el año 2017. En orden decreciente, los 5 países con más altos ingresos son Noruega, Kuwait, EUA, Arabia Saudita y Suecia, mientras que los 5 países con menores ingresos son Senegal, Kenia, Mali, Chad y Niger. Las variables de bienestar son la fracción de la población adecuadamente alimentada (círculos verdes), la fracción de la población con servicios básicos de agua potable (círculos grises), la expectativa de vida normalizada (círculos violetas), y la fracción de la población con educación primaria completa (círculos amarillos). La variable expectativa de vida se normalizó dividiendo los valores por el promedio correspondiente a los países con mayores ingresos (quintil superior). Algunas de estas variables no pueden superar el valor de uno, como por ejemplo la fracción de la población adecuadamente alimentada y la fracción de la población con servicios básicos de agua potable. La variable expectativa de vida, en cambio, como se normalizó dividiendo los valores por el promedio correspondiente a los países con mayores ingresos (quintil superior), puede superar el valor de 1 en algunos de estos países. Finalmente, la fracción de la población con educación primaria completa, por su modo de cálculo, puede ser mayor a 1 si ingresan a cursar estudios primarios personas de mayor edad que la habitual.

El desvío estándar de estas variables varía entre 0,09 y 0,17. El PBI *per cápita* se tomó como estimador del ingreso *per cápita*. Los ingresos están expresados como USD 2011 y ajustados por paridad de poder adquisitivo (ppa). Las remesas y el lugar de residencia entre otros factores pueden afectar esta relación. Elaborado a partir de datos de FAO (2020) y Gapminder (2020). La línea corresponde al ajuste de todos los datos a la función $y = 0.4256x / (1 + 0.4223x)$. $R^2 = 0,86$. Para el ajuste se fijó una restricción de valor máximo = 1.

el poder adquisitivo de las personas y muestran una clara tendencia curvilínea con estabilización en determinados valores de ingresos *per cápita*.

La Figura 67 presenta, para un conjunto de 36 países representativos de la variabilidad mundial, la relación de las variables seleccionadas indicadoras del desarrollo humano con el poder adquisitivo promedio. Ellas son a) la fracción de población bien alimentada, b) la fracción de la población con servicios básicos de agua potable, c) la expectativa de vida normalizada, y d) la fracción de la población con educación primaria completa. A juzgar por los datos mostrados en la Figura 67, las variables seleccionadas se asocian con el ingreso *per cápita* de manera similar. Además, no difieren mayormente en la variación que presentan ya que el desvío estándar oscila entre 0,09 y 0,17. Por su comportamiento similar, las variables se integraron con igual ponderación en una única función con valor máximo de 1. Este indicador integrado se asocia, aunque de manera no lineal, con el índice de desarrollo humano elaborado por las Naciones Unidas (Figura 68).



Los datos muestran i) una asociación directa positiva entre las variables seleccionadas de desarrollo humano y el ingreso *per cápita* promedio entre 0 y 15 USD, ii) una clara curvilínealidad entre 15 y 35 USD, y iii) una escasa o nula respuesta con valores superiores a 40 USD (dólares de 2011 ajustados por ppa). La respuesta del indicador de desarrollo a la mejora de los ingresos *per cápita* es marcada cuando los ingresos son bajos, aunque con alta variabilidad. A un ingreso diario promedio de 20 USD *per cápita* le corresponde un valor promedio del indicador integrado de 0,90. Estos datos indican que el nivel de ingreso promedio es

muy deficiente en los países más pobres, por encontrarse por debajo del valor que asegura la satisfacción de necesidades básicas de la población.

La tasa de fecundidad responde de manera inversa al ingreso *per cápita* promedio (Figura 69). Es decir, se reduce fuertemente entre 0 y 20 USD, alcanza un valor cercano al correspondiente a la estabilización poblacional (aproximadamente 2 hijos por mujer) con 40 USD, y no responde mayormente a valores superiores.

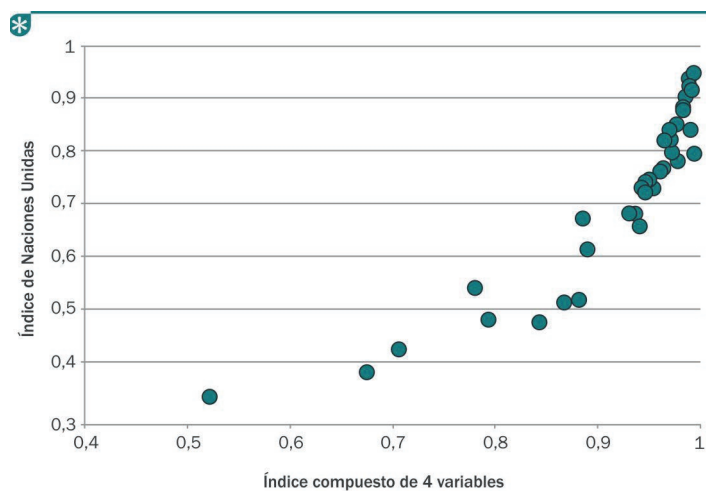


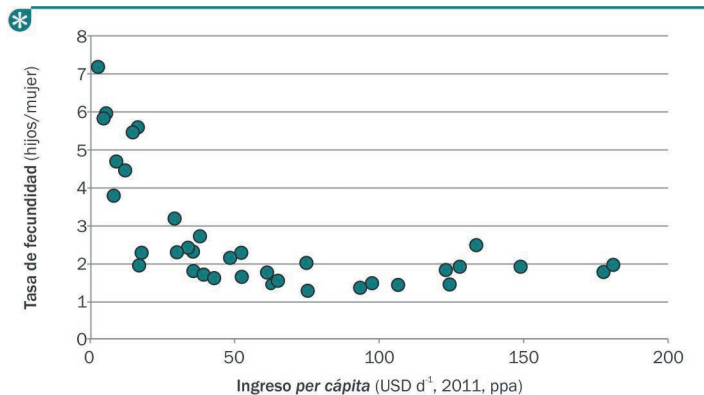
Figura 68: Relación entre el índice de desarrollo humano de las Naciones Unidas (eje y) y el índice de desarrollo humano obtenido por la integración de 4 variables seleccionadas de salud, nutrición, educación y acceso a agua potable (eje x) para 36 países (indicados en la Figura 74a) representativos de los 5 continentes en el año 2017. Para el eje x se tomaron los datos resultantes de la ecuación de ajuste de la Figura 67.

6.3.2. Los ingresos y el consumo

Las variables de consumo también se asocian positivamente con el nivel de ingresos por habitante, con respuesta lineal o casi lineal en el rango analizado. Por ejemplo, el consumo promedio de energía por persona se asocia directa y linealmente con el ingreso promedio por individuo (Figura 70a). El mayor consumo de energía, a su vez, determina mayores emisiones de gases de efecto invernadero (Figura 70b), ya que la matriz energética actual se compone principalmente de combustibles fósiles. Los países que tienen una matriz energética más diversificada con mayores aportes de fuentes alternativas escapan a esta relación. La demanda de calorías y proteínas de cultivos por persona también se incrementa, aunque de manera levemente curvilínea, a medida que aumenta el nivel de ingresos promedio por habitante (Figura 32) debido, principalmente, al aumento del consumo de carne (Figura 31) y en menor medida al incremento en las calorías consumidas en la dieta. Según lo descrito en el Capítulo 3, una alta demanda de productos de cultivos significa mayor presión sobre el ambiente.



Figura 69: Relación entre tasa de fecundidad expresada como hijos por mujer e ingreso *per cápita* por día para 36 países (indicados en la Figura 74a) representativos de los 5 continentes en el año 2017. Los datos corresponden a promedios dentro de cada país. Los ingresos están expresados como USD 2011 y ajustados por paridad de poder adquisitivo. Elaborado sobre datos de FAO (2020) y Gapminder (2020).

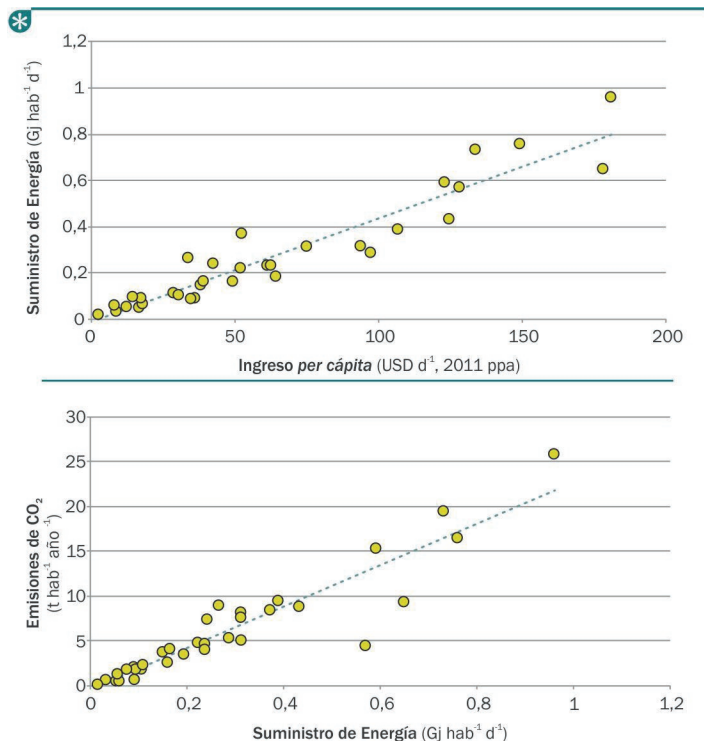


La Figura 71 integra, en una única escala normalizada, las relaciones de uso de energía *per cápita* y de kilocalorías de cultivos demandadas para alimentación humana y animal en función del poder adquisitivo promedio por habitante ajustado por inflación.

Otros efectos desfavorables para el ambiente, como la producción de desechos y residuos, también se asocian directamente con los ingresos *per cápita*. Tal es así que los países más ricos, que solo albergan el 16 % de la población mundial, generan el 34 % de los desechos globales (Sección 3.6).



Figura 70: A) Relación entre suministro de energía primaria en Gigajoules por habitante y por día e ingreso *per cápita* por día. Los ingresos corresponden al año 2017 y están expresados como USD 2011 y ajustados por paridad de poder adquisitivo (gráfico superior). B) Relación entre emisiones de CO₂ por quema de combustibles fósiles y el suministro de energía primaria por habitante y por día en (Gigajoules) (gráfico inferior). Los datos de ingresos y energía corresponden al año 2017 y los de las emisiones de CO₂ al año 2014. La ecuación de ajuste para el gráfico superior es $y = 0,0045x - 0,0114$; $R^2 = 0,90$ y para el gráfico inferior es $y = 22,97x - 0,422$; $R^2 = 0,87$. Los datos corresponden a los promedios de 36 países (indicados en la Figura 74a) representativos de los 5 continentes. Elaborado a partir de datos de FAO (2020); Gapminder (2020) e IEA (2019).



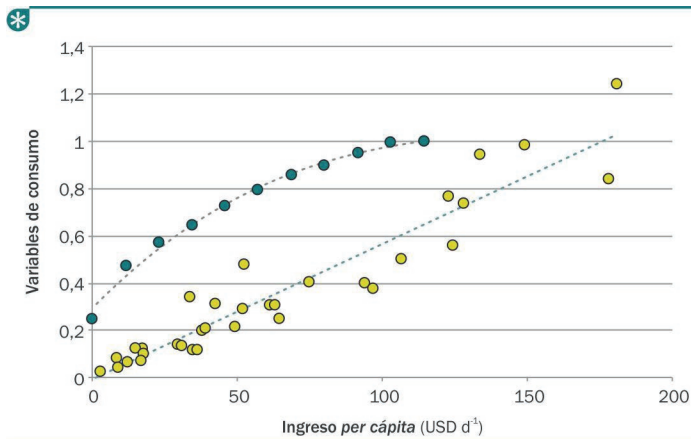


Figura 71: Relación entre variables de consumo e ingreso promedios *per cápita* por día. Las variables de consumo son suministro de energía primaria por habitante (círculos amarillos) y kcal de cultivos demandadas por habitante (para consumo alimentario humano y animal; círculos verdes). Las variables fueron normalizadas dividiendo todos los valores por el promedio de aquellos correspondientes a los ingresos más altos (quintil superior). Los datos de la curva de energía corresponden a los promedios de 36 países representativos de los 5 continentes en el año 2017, y los ingresos están expresados como USD 2011 y ajustados por paridad de poder adquisitivo. Elaborado basado en datos de FAO (2020) y Gapminder (2020). Los datos de demanda de kcal de cultivos fueron obtenidos de Tilman *et al.* (2011) ajustando por inflación al año 2011 los ingresos promedios correspondientes al año 1990. Las líneas corresponden a los ajustes de los datos a las funciones $y = 0.0058x - 0.0123$ ($R^2 = 0.90$) para consumo de energía; $y = -0.000049x^2 + 0.0115x + 0.2993$ ($R^2 = 0.99$) para demanda de kcal de cultivos.

6.3.3. Desarrollo humano, consumo e ingresos

La integración de las variables de desarrollo humano y del consumo en función de los ingresos promedio por habitante permite arribar a importantes conclusiones.

Más allá de un promedio de 40 USD por habitante por día, valor que corresponde a consumos de energía diarios de 0,20 GJ por persona (Figura 70a), no se observan mejoras significativas en las variables de desarrollo humano seleccionadas (Figura 67) pero continúan aumentando el consumo de energía (Figura 70a) y, con la matriz energética y tecnologías actuales, las emisiones de gases de efecto invernadero (Figura 70b). Esto indica la necesidad de moderar consumo y de utilizar fuentes renovables eficientemente. El aumento de los ingresos promedio en el rango de 0 a 20 USD se traducen en incrementos importantes en uso de energía por individuo y en las variables de calidad de vida (Figuras 70a y 67). Estos aumentos implican considerables incrementos en el uso de energía global, por lo que mejorar la situación de la población pobre requiere fuentes renovables y limpias y una mayor eficiencia de uso para evitar importantes daños ambientales. Las fuentes de energía renovables pueden entonces reducir el daño por excesos en países ricos y aportar al desarrollo de los países pobres sin producir impactos ambientales negativos.

Un análisis similar se puede realizar para la demanda de kilocalorías de cultivos. Para ingresos bajos, los aumentos se traducen en mejoras proporcionales en calidad de la dieta (Figura 71) y en las variables de desarrollo social (Figura 67). Mejorar la situación de la población de bajos ingresos implica incrementos en demandas de productos vegetales para alimentación humana y animal. Sin embargo, más allá de un poder adquisitivo promedio de 40 USD por habitante por día no se observan mejoras significativas en las variables de desarrollo humano pero continúan aumentando las

demandas de alimentos (Figura 71) y, por lo tanto, los efectos negativos sobre el ambiente y la salud (Capítulo 3 y Sección 5.1.1). Las dietas sanas y moderadas pueden reducir el daño por excesos en países ricos y aportar a una mejor y más sostenible nutrición de los habitantes de los países pobres.

Como ya fuera establecido, es necesario moderar y regular las demandas de energía, alimentos y materiales, utilizar eficientemente fuentes de energía renovables y limpias, consumir dietas eficientes más sanas, reducir pérdidas y desperdicios, y fomentar la reutilización, el reciclaje y la bioconversión de desechos y residuos. En este sentido, es importante no tomar como modelo las costumbres de producción y consumo que conducen a extralimitaciones y daño ambiental.

En términos generales, este análisis resalta que con determinados niveles de poder adquisitivo promedio se alcanzan las metas de desarrollo humano mientras que el consumo y el consecuente impacto ambiental continúan creciendo. Si bien tiene defectos, ya que las variables de ingreso *per cápita* y las de consumo están expresadas como promedios de cada país y considera sólo variables básicas de desarrollo humano, revela la importancia de moderar hábitos de consumo y de alcanzar los objetivos de desarrollo social utilizando tecnologías sostenibles.

Este análisis permite entender la variación en desarrollo humano y consumo entre países y su asociación con el poder adquisitivo. Sin embargo, utilizar datos promedios de ingresos sin considerar su distribución conduce a errores, ya que para un determinado valor promedio, los ingresos de las personas más pobres serán menores cuanto mayor sea la inequidad dentro del país en cuestión. Además, los promedios sobreestiman el ingreso individual que posibilita a la persona alcanzar las metas indicadas de desarrollo social. Por estas y otras razones, y para precisar la magnitud de la pobreza en el mundo, resulta necesario analizar la distribución de los ingresos y el grado de inequidad de la población.

6.3.4. La distribución de los ingresos y la inequidad

La inclusión en estos análisis de las poblaciones y de la distribución del poder adquisitivo de los habitantes permite un mejor monitoreo de los avances en cuanto a las metas de reducir la pobreza y mejorar el bienestar de las personas. La Figura 72 muestra la población acumulada global y su distribución en función de los ingresos diarios *per cápita* para el año 2018. Si bien se lograron progresos en las últimas décadas, persiste una gran desigualdad en la distribución de la riqueza a nivel mundial, representada por los bajos valores relativos correspondientes al 50 % más pobre de la población (Figura 72a), y el fuerte sesgo hacia la derecha en las distribuciones ilustrado por el pico contiguo al eje y (Figura 72b).

Para detallar esta realidad, la Figura 73 muestra para el mundo en su conjunto la curva de ingresos acumulados en función de la población acumulada, en la que los valores se acumulan desde los grupos de menores a los de mayores ingresos. La línea indicada con círculos blancos representa la igualdad, en la que cada persona contribuye en igual proporción a los ingresos totales. El coeficiente de desigualdad de Gini es el cociente entre la superficie incluida entre las 2 funciones y la superficie total bajo la línea de igualdad, por lo que puede tomar valores entre 0 y 1. A mayores índices, mayor es la inequidad. Para la población del mundo, ignorando sus países de origen, el coeficiente de Gini es 0,592. Este índice, junto con la disparidad de ingresos promedio entre países (Figura 67), refleja fuertes inequidades a nivel de la población global.

Surge de estos datos que vivimos en un mundo desperejo. El 5 % más rico de la población acumula ingresos similares a los correspondientes al 74 % más pobre (Figura 73). Además, el 10,4 % de la población mundial sufre extrema pobreza (año 2018), o sea incapacidad para satisfacer las necesidades materiales básicas (agua potable, alimentación, vivienda, salud y educación), por percibir ingresos inferiores a 1,9 USD por persona y por día (USD 2011, ppa; Figura 72). Cálculos basados en la integración de la curva de distribución de la población en función de los ingresos indican que se requieren 240 mil millones de dólares anuales (base 2011, ppa) para llevar los ingresos mundiales inferiores al umbral de extrema pobreza a dicho valor umbral.

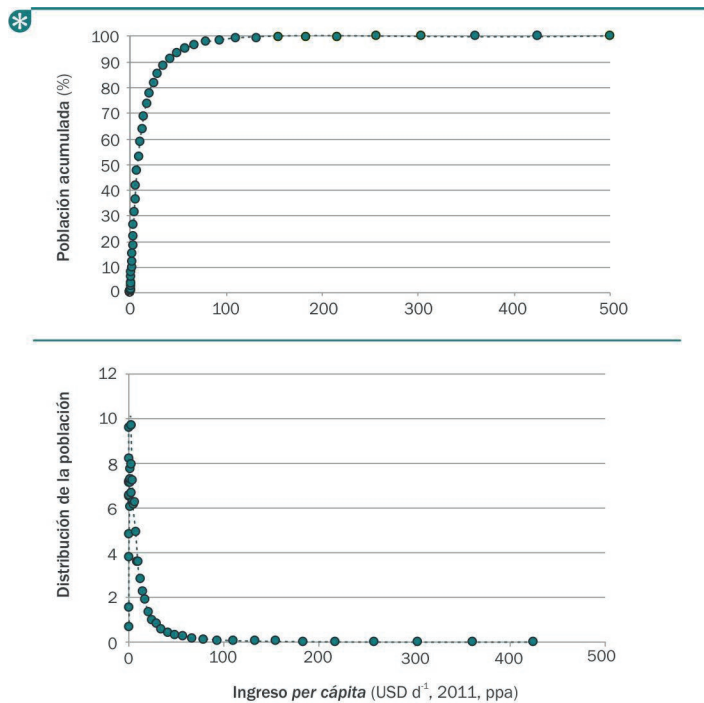
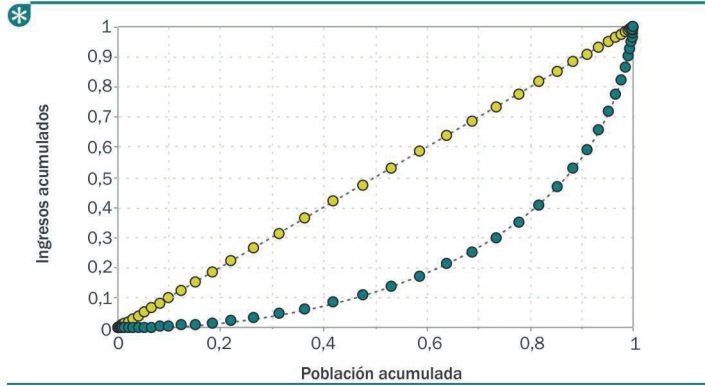


Figura 72: A) Población mundial acumulada en función de los ingresos diarios *per cápita* (arriba); y B) distribución de la población en distintos niveles de ingresos *per cápita* (abajo). La curva de distribución es una aproximación mediante cocientes de la derivada de la curva de acumulación. Los ingresos están expresados como PBI *per cápita* y por día y están expresados como USD 2011 y ajustados por paridad de poder adquisitivo. Extrema pobreza corresponde a ingresos inferiores a 1,9 USD *per cápita* y por día. Los datos corresponden al año 2018. Relaciones construidas a partir de datos de Gapminder (2020).



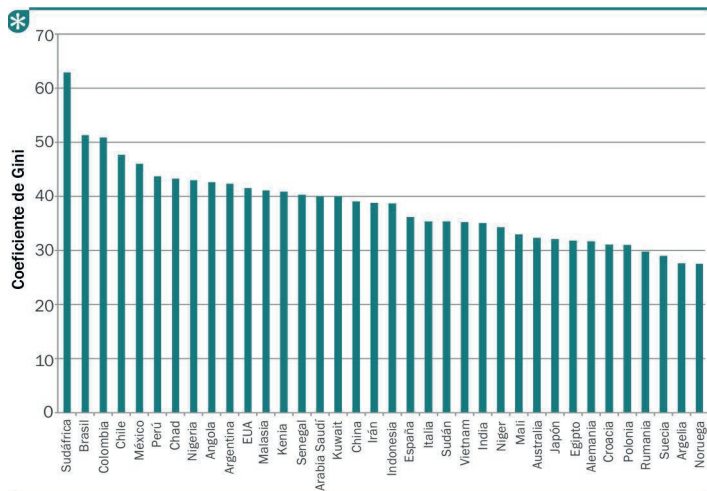
Figura 73: Ingresos acumulados en función de la población acumulada para el mundo (círculos grises). Los valores se acumulan desde los grupos de menores a los de mayores ingresos. La curva indicada con círculos amarillos representa la igualdad ($Y=X$) en la que cada fracción de la población acumula ingresos proporcionales. El índice de Gini es igual a la relación entre el área comprendida entre las dos curvas y el área debajo de la curva de igualdad. Esta última es igual a 0,5, dado que ambas escalas tienen un máximo de 1. El índice de Gini para la población mundial es 0,592 y se calculó como dos veces la integral entre 0 y 1 de la diferencia entre las dos funciones representadas en la figura. Elaborado sobre datos de distribución de población mundial en función de sus ingresos (ppa) (Gapminder, 2020).



Los valores del coeficiente Gini difieren entre países (Figura 74a). Los países nórdicos presentan bajos valores, mientras que Sudáfrica muestra el mayor índice, con un valor parecido al del mundo en su conjunto. Si bien en las últimas décadas las desigualdades entre países y a nivel de la población global se fueron reduciendo en términos relativos, la brecha absoluta de ingresos medios entre países creció (Figura 30) y en varios países se incrementó la desigualdad interna (Figura 74b). Para los países analizados, el coeficiente de Gini no se asoció con el ingreso promedio de los habitantes ($R^2 = 0,08$, ns.). Es importante considerar que la reducción de la desigualdad debe estar acompañada por la mejora del ingreso medio.

En síntesis, la pobreza es consecuencia de bajos ingresos promedio y de la mala distribución de los ingresos individuales. La información presentada en esta sección contribuye a determinar con mayor precisión las necesidades de mejoras de los ingresos de la población.

En la próxima sección se presenta la evolución del número y porcentaje de desnutridos en el mundo y en los continentes y su relación con la pobreza.



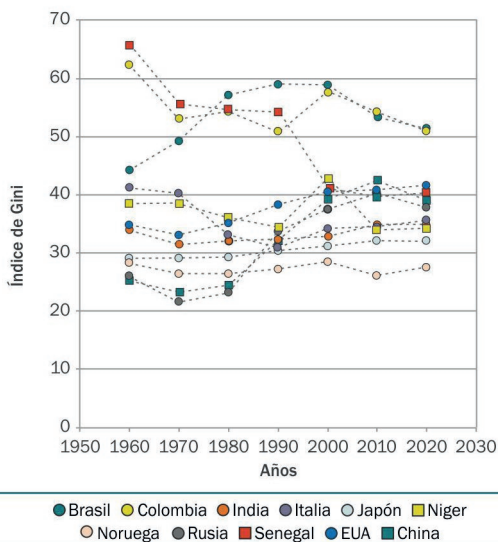


Figura 74: A) Coeficiente de Gini actuales para diferentes países del mundo representativos de los 5 continentes (gráfico superior); y B) Evolución del índice de Gini para países de distintos continentes entre 1960 y 2020 (gráfico inferior) (Gapminder, 2020). Los ingresos promedio varían para estos países entre 2,5 y 180 USD (2011, ppa) *per cápita* y por día.

6.3.5. Pobreza y desnutrición

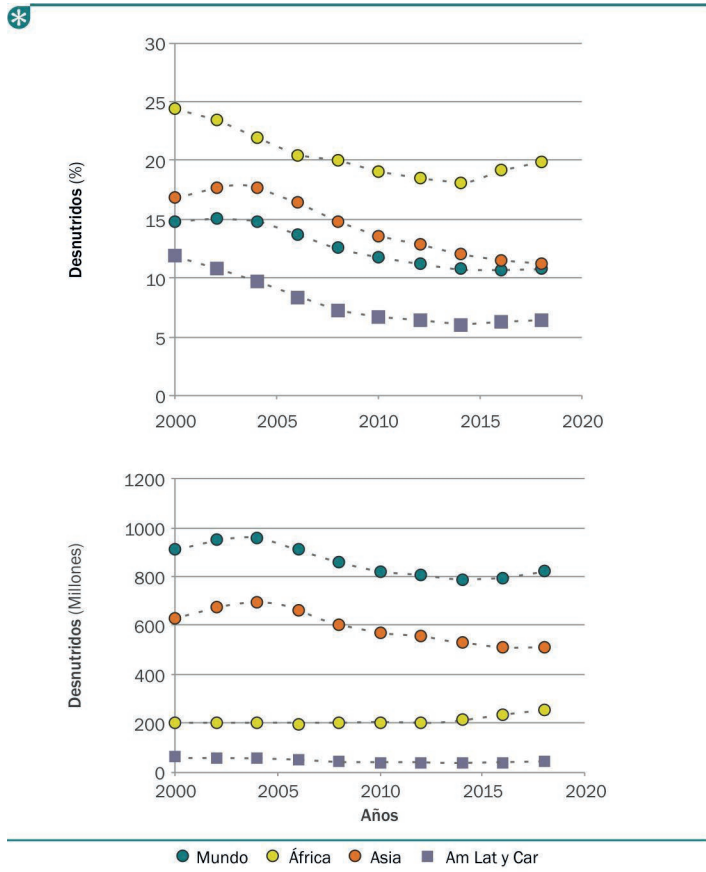
El número actual de personas cuyo consumo de energía en la dieta está continuamente por debajo del mínimo valor requerido para mantener una vida saludable y desarrollar una actividad física ligera es de alrededor de 820 millones (FAO, 2018). Este valor creció en los últimos años (Figura 75). África es el continente con mayor porcentaje de personas mal nutridas y Asia el continente con mayor número de personas en esta condición. La FAO estima la prevalencia de desnutridos a partir de estadísticas que evalúan la cantidad de alimentos disponible basadas en encuestas que determinan la variación de consumo de alimentos entre las familias.

Considerando datos de distintas regiones en diferentes décadas, el porcentaje de desnutridos está asociado significativamente ($R^2 = 0,97$; $p < 0,001$) con el porcentaje de individuos con ingresos inferiores a 1,9 USD (2011, ppa) *per cápita* y por día, o sea, en extrema pobreza. Como ejemplo de esta estrecha asociación, en el año 2015 el número total de desnutridos era 800 millones y el número total de personas en extrema pobreza alcanzaba los 830 millones. Estos datos fortalecen la causalidad entre pobreza y desnutrición.

Muchos más individuos sufren de deficiencias de micronutrientes (EU, 2015; Micronutrient Initiative, 2015; Caparrós, 2014) y un total de 1.900 millones padecen moderada a severa inseguridad alimentaria (Roser y Ritchie, 2013). Severa inseguridad significa desnutrición y hambre, mientras que moderada inseguridad se relaciona con la inhabilidad de disponer regularmente de dietas sanas y nutritivas. La extrema pobreza es además causal de la no satisfacción de las otras variables de desarrollo social (Sección 6.3.1).



Figura 75: Evolución del porcentaje y del número de personas desnutridas en el mundo, África y Asia y América Latina y Caribe desde el 2000 al 2018 (FAO, 2018).



En África subsahariana y en algunos países del sur de Asia (como Afganistán, Yemen y Pakistán) el porcentaje y la cantidad de desnutridos creció en los últimos años. En la región subsahariana de África, el aumento demográfico fue mayor que el incremento en la producción de alimentos entre 2015 Y 2018, por lo que cayó la producción por habitante (FAO, 2020). Esto se agrava todavía más al considerar que es la región que mostrará en las próximas décadas mayores efectos del cambio climático (Sección 3.1) y mayor crecimiento poblacional (Sección 4.1). Los datos no son alentadores.

La pobreza es el principal determinante de los problemas de inseguridad alimentaria mencionados. Por lo tanto, a los desafíos de satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental se les suma reducir la pobreza, promoviendo el desarrollo humano en todas las regiones y países del planeta. Dada su relevancia, en las próximas secciones se analizan los progresos en reducción de la pobreza en las últimas décadas y las causas de la misma.

6.3.6. Los progresos

En las últimas décadas, la humanidad ha logrado una notable reducción de la pobreza extrema (Figura 76) y de la tasa de fecundidad (Figura 7), y una mejora de la expectativa de vida (Figura 7) y del nivel educativo de la población. Con respecto a esta última variable, la población mundial mayor a 15 años con capacidad de leer y escribir superó el 85 % en el año 2015 (Roser y Ortiz Ospina, 2018) cuando en 1950 apenas alcanzaba el 56 %. Sin embargo, el porcentaje de la población alfabetizada aún permanece bajo (< 60 %) en Pakistán, Afganistán y en varios países de África.

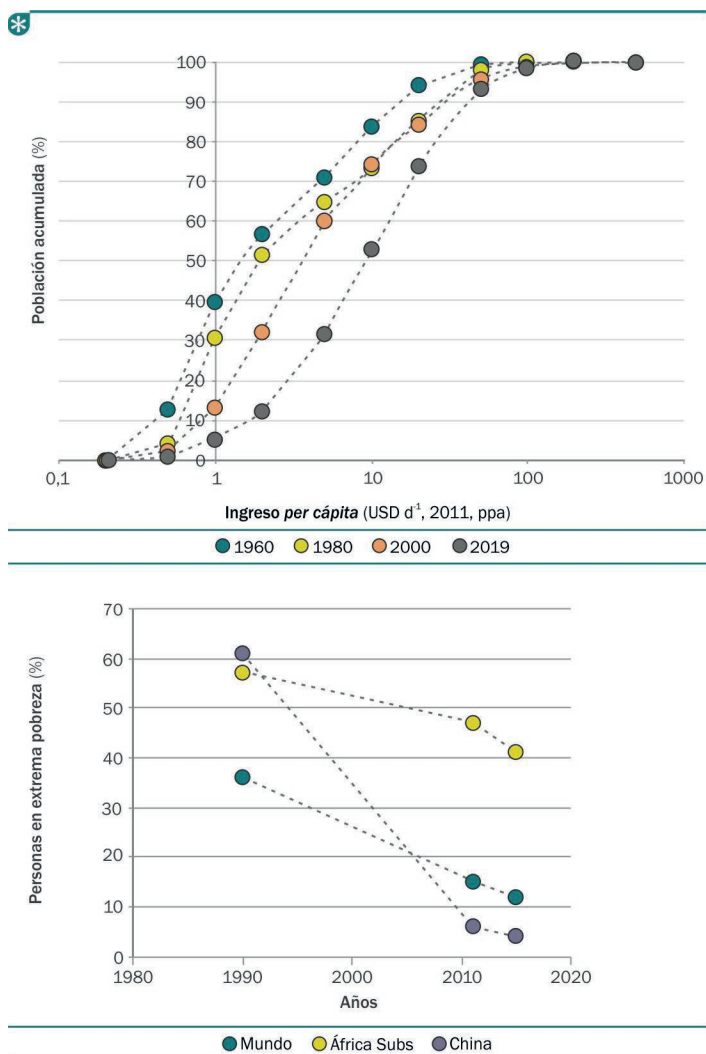


Figura 76: A) Población mundial acumulada en función de los ingresos diarios (escala logarítmica) *per cápita* para 1960, 1980, 2000 y 2019 (gráfico superior). Los ingresos son estimados como PBI *per cápita* y por día, ajustado por paridad de poder adquisitivo y expresados como USD 2011. Ingresos inferiores a 1,9 USD *per cápita* y por día corresponden a extrema pobreza. B) Porcentaje de personas en extrema pobreza en el mundo, China y África subsahariana entre 1990 y 2015 (gráfico inferior). Datos de Gampinder, 2020 y Tugore Ques, 2016).

Los niveles de ingresos *per cápita* diarios de la población mundial han aumentado en las últimas seis décadas (Figura 76a). En 1960, el 50 % de la población mundial poseía ingresos menores a 1,5 USD diarios. Este valor creció a 1,95 en 1980, a 3,8 en 2000 y a 8,7 en 2019. A juzgar por las pendientes de las curvas presentadas en la Figura 76a, las distribuciones de los ingresos en la población mundial redujeron su bimodalidad a lo largo de los años. Por lo tanto, el índice de Gini bajó marcadamente en las últimas décadas. Como dato emblemático del progreso de países en vías de desarrollo, China recientemente recuperó el liderazgo en aporte porcentual al PBI mundial que ostentaba siglos atrás (Tugore Ques, 2016).

En consecuencia, el porcentaje de personas en extrema pobreza en el mundo se redujo de 36 a 12 % entre 1990 y 2015, aunque con importantes diferencias entre países (Figura 76b). En China, esta variable se redujo notablemente de 61 a 4 % mientras que en los países de África subsahariana solo cayó de 57 a 41 % (Tugore Ques, 2016; Gapminder, 2020). Por lo tanto, el mundo ha hecho significativos progresos en reducción de la desnutrición y de la inseguridad alimentaria en las últimas décadas. La producción agrícola *per cápita* promedio mundial aumentó (Figuras 9 y 10) y el porcentaje de desnutridos en el mundo se redujo sensiblemente, cayendo del 18 al 11 % a nivel mundial en los últimos 25 años.

Cálculos realizados por Vos y Bellu (2019) indican que, en los últimos 50 años, la proporción de cereales en la cantidad aparente de energía consumida en países de bajos y medios ingresos bajó del 57 al 50 %, mientras que la proporción de productos animales subió del 8 al 13 % y la de frutas y vegetales del 4 al 7 %, respectivamente. Los cambios en las dietas de estos países constituyen una mejora y una aproximación a las preferidas por los habitantes de los países más ricos.

Lamentablemente, en los últimos años se ha producido un incremento en número de desnutridos en el mundo y en el porcentaje de desnutridos en África (Figura 75) y el índice de inequidad sigue siendo alto. La pobreza y la marginalidad constituyen las mayores causas de inseguridad alimentaria y de carencias y privaciones en cuestiones básicas como salud, educación y seguridad en muchos países del mundo (Monckeberg, 1993; Arriagada, 2000; Cittadini, 2010; Butler, 2010; Nature, 2010; EU, 2015; Nature, 2020). Es, por lo tanto, necesario analizar las causas de la pobreza.

6.3.7. Causas de la pobreza

Las causas de la pobreza generalmente se sustentan en la negligencia, corrupción o inoperancia de los gobiernos, en la concentración económica, en la explotación y descuido de los más po-

bres, en problemas sociales y en conflictos armados. Estos últimos actualmente devastan a varios países como por ejemplo Yemen, Siria, Afganistán, Somalia y Sudán del Sur. En relación con aspectos económicos, muchos países en vías de desarrollo exportan sus recursos primarios a bajos precios, con la anuencia y complicidad de sus gobiernos. Además, el potencial generador de riqueza de la globalización se disipa a causa de las gestiones al servicio de los intereses de unos pocos en detrimento de los del conjunto de la población mundial (Stiglitz, 2002; Tugore Ques, 2016). Asimismo, en el transcurso de las últimas décadas, una parte creciente del PBI fue afectada a remunerar el capital mientras que la proporción atribuida a remunerar el trabajo no dejó de disminuir (Gorz, 2000; Piketty, 2015). Es necesario entonces promover el crecimiento económico equitativo y democrático de los países y propiciar una mejor gobernanza de la globalización (Stiglitz, 2002).

La degradación ambiental es otro factor que promueve pobreza y agrava la desigualdad (Encíclica Laudato SI, 2015). Los más carenciados generalmente dependen más del ambiente para su subsistencia y están más expuestos a las inclemencias climáticas por lo que sufren en mayor proporción las consecuencias de la degradación de hábitats y del cambio climático. Las penurias que sufren los habitantes de los países del Sahel ante el avance del desierto del Sahara y los de Bangladesh frente a las inundaciones por elevación del nivel del mar son claros ejemplos de estas situaciones.

Diffenbaugh y Burke (2019) concluyen que el cambio climático ha contribuido a la desigualdad económica global por favorecer el crecimiento económico de países ricos de zonas frías, y frenarlo en zonas subtropicales y tropicales en las cuales se ubican la mayor parte de los países pobres. Como resultado, si bien la desigualdad entre países ha bajado en términos relativos a lo largo de las últimas décadas, es altamente probable que el aumento de la temperatura haya frenado el ritmo de esta reducción.

Entonces, el cambio climático, la degradación de suelos y hábitats y la escasez de agua están comprometiendo la seguridad alimentaria y se pronostican aún mayores perjuicios en el futuro. Estos son los problemas ambientales que mayor pobreza e inequidad generan. Proyecciones con modelos de cultivo y económicos basadas en dichos efectos indican que el precio de los cereales y de los alimentos aumentará hacia el 2050, disminuyendo la seguridad alimentaria de los consumidores de bajos ingresos, especialmente de regiones tropicales y subtropicales (IPCC 2019d). Estas situaciones llevan, en muchos casos, a que las personas con necesidades acuciantes refuercen la intensidad de explotación de los recursos naturales, retroalimentando el daño ambiental y sus consecuencias. Además, la pobreza limita la capacidad de adapta-

ción al cambio climático y de inversión en investigación y extensión para un manejo agropecuario sostenible (IPCC 2019c).

El crecimiento económico debe entonces ser sostenible desde el punto de vista ambiental. El hecho de que los que más sufren las consecuencias son los que menos responsabilidad tuvieron y tienen por el calentamiento global es una injusticia flagrante que debe ser resuelta. En términos más generales, la volatilidad de los precios, originada por factores ambientales, financieros, estacionales, y por factores de oferta y demanda, impacta fuertemente sobre los más pobres si no se toman las medidas adecuadas (De Janvry, 2010).

La falta de una adecuada educación y la desnutrición infantil re-crean la pobreza. Una educación deficiente atenta contra la movilidad social (Russell, 1932; Huerta Wong, 2012) mientras que una alimentación deficitaria en los primeros años de vida reduce el desarrollo del cerebro afectando de por vida la capacidad intelectual del individuo (Monckeberg, 1993). Por lo tanto, los objetivos de estado y mundiales (UN, 2015b) deben dirigirse a mejorar la educación, la nutrición y la salud de la población por su sentido humanitario, pero además como la mejor inversión que un país puede hacer para su desarrollo económico y social (Schultz, 1960).

Por último, el crecimiento económico estuvo históricamente ligado a la explotación y al consumo de recursos naturales. En países desarrollados, la relación se ha debilitado al menos para algunos recursos (Van Asselt *et al.*, 2005). La agricultura tiene aún un rol importante en el desarrollo social de países pobres porque, además de producir los alimentos requeridos, muchos de sus habitantes son agricultores. Dos tercios de las personas que padecen hambre viven en zonas rurales. De unos 570 millones de explotaciones agrícolas en el mundo, más de 475 millones tienen menos de 2 hectáreas. La pobreza rural y la inseguridad alimentaria van de la mano; sin embargo, son pocas las investigaciones pertinentes para las necesidades de los pequeños agricultores y sus familias (Nature, 2020).

Toman entonces relevancia la investigación y la innovación para producir más alimentos donde más se los requieren y reducir la desigualdad entre regiones y modalidades tecnológicas de producción. Se debe prestar mayor atención a la producción local para abastecer mercados locales y regionales, pues genera puestos de trabajo, promueve el desarrollo de los territorios, y disminuye la energía utilizada en el transporte de los productos.

Los países más pobres son los que más crecen en población, los que menos aumentan sus ingresos absolutos, los que mayor impacto ambiental sufren, y los que menos capacidad de reacción tienen. Este contexto, que constituye el principal problema que hoy afronta la humanidad, conduce a importantes movimientos migratorios que se intensificarán a lo largo del siglo XXI.

Erradicar la pobreza requiere, por lo tanto, i) acciones inmediatas para romper el círculo vicioso entre desnutrición infantil y pobreza, ii) programas de desarrollo social sostenidos que incluyan principalmente la educación para promover equidad, movilidad social e igualdad de oportunidades, iii) revertir el deterioro ambiental, iv) promover el crecimiento económico sostenible, equitativo y democrático de los países, v) propiciar una mejor gobernanza de la globalización y vi) desarrollar la producción local (Stiglitz, 2002; Leonardi *et al.*, 2015; Encíclica Laudato SI, 2015; EU, 2015).

Finalmente, la reducción de la pobreza beneficiaría a todos los habitantes del mundo (Raskin *et al.*, 2002; Steffen y Stafford Smith, 2013). La inequidad dentro de cada país afecta la cohesión social ya que se relaciona directamente con problemas como violencia, crímenes, encarcelamiento, falta de confianza, enfermedades mentales, embarazos en la adolescencia, obesidad, abuso de drogas y bajo rendimiento educativo de los escolares (Wilkinson y Pickett, 2009).

En la próxima sección, se remarca la necesidad de mejorar los indicadores de desarrollo para que contemplen, además del crecimiento económico, aspectos sociales y ambientales.

6.3.8. Nuevos indicadores y objetivos de desarrollo social

Hay distintas maneras de estimar las mejoras de la situación económica y social de los habitantes de un país. La más común es utilizar el PBI dividido por el número de habitantes. Pero este indicador, si bien lleva implícita una cierta relación causal con variables de desarrollo social (Figura 67), ésta es poco precisa por presentar omisiones en relación con la disparidad de poder de compra, los términos de intercambio, la conformación del grupo familiar, el nivel de expectativas de las personas, la distribución de los ingresos, la consideración de subsidios o gastos de seguridad y protección social, la sostenibilidad en términos ambientales y productivos, entre otras. La consideración de la paridad de poder adquisitivo (Figura 67) y de la distribución de la población en función de los ingresos (Figura 74) constituyen mejoras, pero es necesario contar con una manera más apropiada para monitorear los avances de la sociedad (Milanovic, 2018).

En muchos países, entonces, los indicadores económicos marcan un progreso general en términos tradicionales, pero sin contemplar que sea, además, ambientalmente sostenible y socialmente aceptable. Existe una tendencia creciente a utilizar otras maneras de medir el desarrollo de los pueblos como alternativas o complementos para el ingreso, el consumo y la utilización de recursos, y que tienen que ver con el ambiente, la educación, salud y bienestar de las personas. Los nuevos indicadores combinan aspectos

de crecimiento económico con otros relacionados con la sostenibilidad y el bienestar de la población (Ripple *et al.*, 2017; Kayal *et al.*, 2019; ver Figura 67).

La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), adoptados por la Asamblea General de las Naciones Unidas (UN, 2015b) fueron concebidos para impulsar el tránsito de todos los países y de la Comunidad Internacional hacia estrategias de desarrollo inclusivas y sostenibles. Son 17 objetivos cada uno con metas específicas que deben alcanzarse para el año 2030.

Estos objetivos son 1) poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo; 2) poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible, 3) garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades, 4) garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos, 5) lograr la igualdad entre los géneros y el empoderamiento de todas las mujeres y niñas, 6) garantizar la disponibilidad de agua y su ordenación sostenible y el saneamiento para todos, 7) garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, 8) promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos, 9) construir infraestructura resiliente, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación, 10) reducir la desigualdad en y entre los países, 11) lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, 12) garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, 13) adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos (tomando nota de los acuerdos celebrados en el foro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático), 14) conservar y utilizar en forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible, 15) proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una ordenación sostenible de los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica, 16) promover sociedades pacíficas e inclusivas para el desarrollo sostenible, facilitar el acceso a la justicia para todos y crear instituciones eficaces, responsables e inclusivas a todos los niveles, y 17) fortalecer los medios de ejecución y revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible (UN, 2015b).

6.3.9. Síntesis

En síntesis, a pesar de las importantes mejoras observadas, el mundo es aún despereado, con excluidos (Caparrós 2014; Piketty,

2015; Encíclica Laudato SI, 2015). Un elevado número de personas se encuentra por debajo de la línea de pobreza por lo que sufre deficiencias nutricionales, mientras que unos pocos poseen ingresos desmesurados a pesar de que los indicadores de desarrollo son independientes de ellos por encima de cierto umbral. Incluso el bienestar, variable mucho más difícil de estimar ya que es afectada por las expectativas, puede disminuir más allá de cierta riqueza si uno se transforma en esclavo de sus bienes (Epicuro, siglo III a. C; Kahneman y Deaton, 2010; Raskin *et al.*, 2002).

La pobreza y la inequidad se han reducido a nivel global en las últimas décadas. No obstante, la información presentada en este capítulo refleja la importante asimetría de ingresos en la población mundial. Si bien se proyectan incrementos del poder adquisitivo de los habitantes en muchos países del mundo, esto lamentablemente no ocurriría, o ocurriría muy lentamente, en el grupo de naciones o regiones más pobres (Tilman *et al.*, 2011; Vos y Bellu, 2019; Figura 30). Las causas que llevan a estas realidades y proyecciones deben ser revertidas.

Las variables de desarrollo social y de consumo muestran relaciones diferentes con el nivel de ingresos promedio *per cápita*. Mientras las primeras presentan una relación curvilínea con saturación, las relacionadas con el consumo continúan creciendo en respuesta al aumento del poder adquisitivo. Estas observaciones, junto con las referidas a la distribución de la población, tienen importantes implicancias en cuanto a requerimientos para alcanzar metas sociales y a ahorros de consumo. Finalmente, se remarca la necesidad de contar con indicadores que combinen aspectos de crecimiento económico, de sostenibilidad y de bienestar de la población.

Surge de la información presentada en las secciones y capítulos anteriores que, sin una profunda transformación de la manera de producir, consumir y distribuir, el mundo no podrá cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (UN, 2015) ni con el Acuerdo Climático de París (UNCCC, 2015).

Alcanzar las metas de una sociedad de bienestar que garantice cuidado ambiental y educación, alimentación, salud, seguridad e igualdad de oportunidades para todos los habitantes del mundo, requiere de dos cualidades inherentes a la especie humana, la innovación y la colaboración.

En los próximos capítulos se discute acerca de las capacidades de innovación y de colaboración como vías para solucionar los problemas que enfrentamos y se plantean escenarios futuros basados en las leyes de mercado, la visión malthusiana o la necesidad de cambios profundos de valores que promuevan equidad y salud ambiental.

7. INNOVAR Y COLABORAR

Para lograr un mundo sostenible debemos fijar objetivos comunes que puedan ser abordados y resueltos valiéndonos de nuestras capacidades de innovación y de colaboración.

En el pasado, nuestra capacidad de innovación nos permitió progresar en cuanto a la producción de alimentos y todo tipo de bienes y herramientas, la disponibilidad de energía, la salud, la expectativa de vida, la comunicación y la educación. En términos generales nos permitió mejorar el nivel de vida.

Si la protegemos, la innovación humana es inevitable, acumulativa-progresiva y exponencial (Figura 77). Es inevitable pues ser innovadores es parte de nuestra naturaleza. Es consecuencia de nuestra gran capacidad cerebral (Figura 2) que a lo largo de nuestra evolución nos proveyó ventajas adaptativas asombrosas. Es acumulativa-progresiva pues actúa como trinquete tecnológico-cultural. Cuando un individuo desarrolla una técnica de utilidad o encuentra una forma más adecuada de hacer algo en el entorno en que se encuentra, otros la copian y aprenden rápidamente, lo cual a su vez puede estimular la creatividad de estos individuos para generar algo aún más útil o novedoso, que entonces los demás adoptan, y así sucesivamente (Tomasello, 2010).

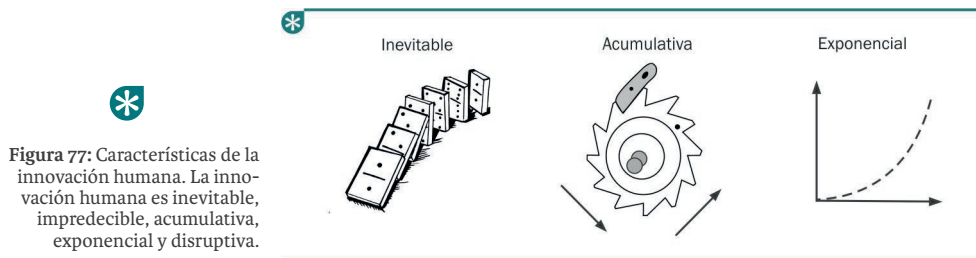


Figura 77: Características de la innovación humana. La innovación humana es inevitable, impredecible, acumulativa, exponencial y disruptiva.

La Figura 78 muestra el número acumulado de los eventos relevantes de creatividad e innovación de nuestra especie identificados en el presente libro en función de una prolongada escala temporal. El primer evento es la invención de las herramientas de piedra primitivas por el *Homo habilis*, 2,5 millones de años atrás. El evento 3 corresponde al control del fuego por el *Homo erectus* hace un millón de años. El evento 9 es el advenimiento de la agricultura a principios del neolítico. Finalmente, entre los

últimos y más recientes acontecimientos, están la revolución agrícola, la revolución verde y la revolución biotecnológica.

La tasa de innovación creció por aumento del número de personas. Pero, en contraste con la evolución de la población mundial, que se estabilizará durante el siglo XXI, la tendencia de eventos de creatividad e innovación es exponencial, sin desaceleración, debido a las virtuosas interacciones entre las personas y a que los productos de nuestra capacidad creadora retroalimentan y potencian dicha capacidad. Las innovaciones y las tecnologías resultantes son entonces aditivas, multiplicativas y potenciadoras. La innovación, por resultar de la creatividad, es también incierta y muy difícil de predecir por su mismo carácter novedoso. Además, las consecuencias no intencionales de las tecnologías son frecuentes y contribuyen a la dinámica de la innovación continua (Sadras, 2020). Comúnmente pueden también desencadenar procesos disruptivos. Estas características de la innovación debilitan los pronósticos sobre producción e impactos ambientales.

Un ejemplo del potencial de interacción entre tecnologías y de la retroalimentación que ejercen en nuestra capacidad innovadora y potencial disruptivo son los robots que controlan malezas. En estas prodigiosas herramientas convergen y se potencian diferentes tecnologías como la robótica, la satelital, la informática, la energía solar, y la de sensores, que posibilitan el control de malezas en un cultivo con mínimas dosis del herbicida correcto para cada especie detectada, o incluso con control mecánico.

Como muestra adicional del avance exponencial de las tecnologías, la Tabla 18 presenta la evolución de la capacidad de almacenamiento de información, que se multiplica por 10 cada 10 años, y la Figura 79 muestra la capacidad de procesamiento de la información por procesadores que se multiplica por 10 cada 5 años (Hilbert y Lopez, 2011). Dichas capacidades informáticas junto con el avance de las comunicaciones y de la conectividad a través de internet generan un asombroso potencial innovador. Las ideas y los conocimientos viajan a lo largo y ancho del mundo a la velocidad de la luz, y cada vez más rápido se duplica la red global de conocimientos y se adoptan las tecnologías.

La innovación es un proceso motivado por la necesidad y el contexto social que puede ser potenciado por una cultura y legislación propicias, por la educación y por enfoques interactivos y multidisciplinarios (Oppenheimer, 2014). Muchos sistemas fracasaron por no cuidar este aspecto relevante de la naturaleza humana. La libertad para la creatividad y la innovación es un requisito esencial para el bienestar de la sociedad.



Figura 78: Número de eventos relevantes de creatividad e innovación identificados en el presente escrito acumulados en función del tiempo desde la aparición de las primeras herramientas de piedra 2,5 millones de años atrás.

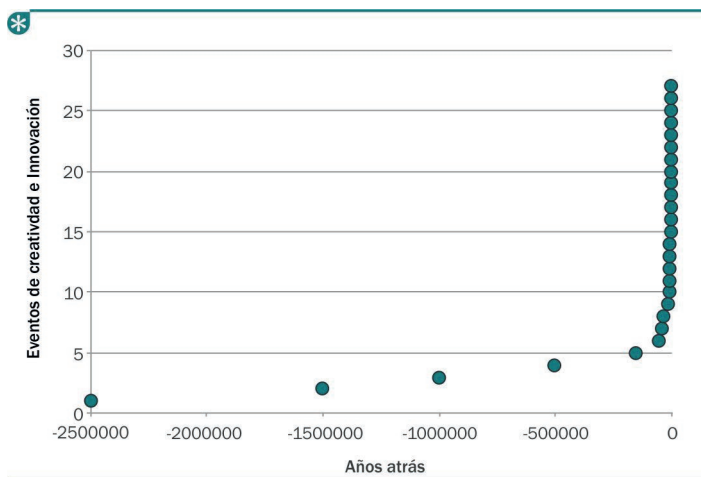


Tabla 18 Capacidad de almacenamiento de datos en EB (10^{18} bytes) en función de los años (Hilbert y Lopez, 2011).

Año	Capacidad
1982	1
1991	10
2002	100
2012	1000

Los avances tecnológicos experimentados son notables. Sin embargo, los problemas sociales, económicos y ambientales persisten e incluso se agudizan en algunas regiones, a pesar de las tecnologías disponibles. Surge entonces un sentido de responsabilidad por utilizar para el bien las maravillosas técnicas que disponemos y las muchas más, incluso inimaginables, que tendremos en el futuro.

El desarrollo tecnológico genera diferentes sensaciones. Entusiasmo en algunos, temores en otros. No obstante, la tecnología no es en sí misma buena o mala, sino que depende de cómo se la utilice. Hemos infringido enormes daños y estos son mayores aun valiéndonos de la tecnología. Pero esta nos brinda la oportunidad de encontrar las soluciones requeridas para los problemas que padecemos en cuanto a inequidad, desnutrición, pobreza y deterioro del ambiente (Griggs *et al.*, 2013; Encíclica Laudato SI, 2015; Leonardi *et al.*, 2015). La capacidad tecnológica creciente no debe estar al servicio de los paradigmas del consumo, de los excesos y del descarte; no debe ser funcional a la explotación irracional de los recursos, ni a los objetivos de corto plazo que responden a planificaciones sectoriales con ausencia de compromiso social y ambiental. Tiene que servir al bienestar de la población.

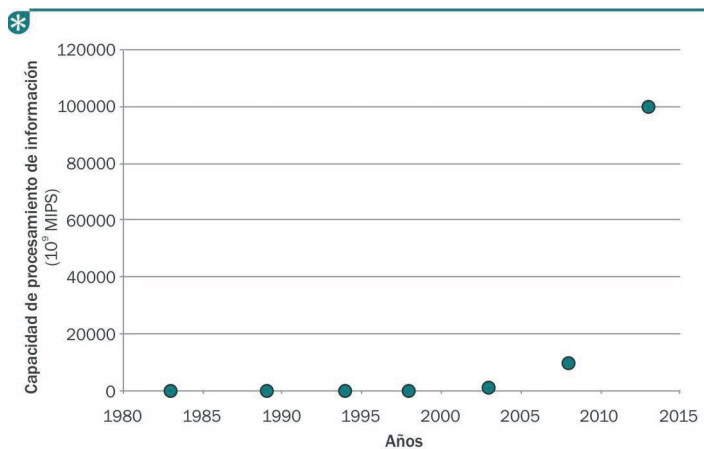


Figura 79: Capacidad de procesamiento de información (10⁹ MIPS, millones de instrucciones por segundo) en función de los años. Esta variable es una medida de la potencia de los procesadores (Hilbert y Lopez, 2011).

¿Podremos poner nuestra capacidad creativa e innovadora al servicio del bienestar de todos?

Si consideramos que la búsqueda de conocimiento, principal motor de la innovación, se sustenta solo en la necesidad de adquirir poder y control sobre los elementos, otras especies vivientes y nuestros congéneres (Nietzsche, 1901), la respuesta no es alentadora. Pero la búsqueda de conocimiento puede ser impulsada, también, por la satisfacción que produce el descubrimiento o entendimiento de algún mecanismo o proceso que explique o prediga el desenvolvimiento de la naturaleza. Porque cuando entendemos las expresiones de la realidad, algo de la grandeza que nos rodea puede impregnar nuestra mente y nuestras acciones e intenciones (Russell, 1912).

Al descubrir, al aprender, nos sobresaltamos tal como seguramente les ocurrió a aquellas personas que hace tanto tiempo produjeron las primeras innovaciones. No me es difícil imaginar el regocijo que experimentó alguno de nuestros ancestros hace miles de años cuando, al atardecer, marcó sobre una roca la dirección del punto más austral en el que se oculta el sol a lo largo de las estaciones, vislumbrando su utilidad para la agricultura. Nada más sabemos de esta persona, no conocemos su nombre, pero portamos sus genes y su espíritu innovador vive en nosotros.

La tecnología no solo debe ser considerada como un conjunto de técnicas, artefactos, máquinas y artificios sino, además, como organizaciones y personas portadoras de intenciones, conocimientos y habilidades (Giuliano, 2007). Si dichas intenciones y sus correspondientes acciones se subordinan a compromisos sociales y ambientales, la tecnología será un medio fundamental para lograr un mundo más justo y sostenible. Pero tenemos que canalizarla

a través de una sólida estructura científico-tecnológica evitando posturas ambientalistas extremas que no valoran adecuadamente dicha capacidad innovadora tanto como posiciones tecnocéntricas extremas que no toman total conciencia de que la tecnología no es neutra sino que, en tanto nos da poder, puede presentar riesgos para nuestro entorno, por lo que debe ser controlada y sus potenciales efectos estudiados.

Nuestras diversas acciones no deben considerarse aisladas, sino en un marco de adecuada gobernanza y claros compromisos. Alcanzar las metas sustentables requerirá entonces, políticas, incentivos y regulaciones adecuadas, inversiones en infraestructura, extensión y transferencia, monitoreo ambiental, desarrollo de indicadores ambientales, productivos, económicos y socio-culturales claros, precisos y efectivos, cambios organizacionales, y, sobre todo, vigorosos esfuerzos por la educación y la capacitación de la población en materia de sostenibilidad (Viglizzo *et al.*, 2006; Speelman *et al.*, 2007; Ripple *et al.*, 2017; Arístide, 2019; Kayal *et al.*, 2019; Cassman y Grassini, 2020). Además, nuestras aproximaciones deben ser multidisciplinarias e integradoras, ya que los problemas que enfrentamos son sistémicos y complejos y las interacciones determinan efectos de mayor magnitud que la suma de los efectos individuales (Wollenweber *et al.*, 2005; García, 2006; Godfray *et al.*, 2010; Morin, 2011). Por lo tanto, para que la ciencia y la tecnología resulten en las innovaciones requeridas se necesita del aprendizaje continuo que deriva de la interacción virtuosa de personas y disciplinas.

Satisfacer las futuras demandas, aliviar la presión sobre el delicado ambiente y erradicar la pobreza requieren esfuerzos no solo de las personas involucradas en la ciencia y la innovación, sino de toda la sociedad en su conjunto (Raskin *et al.*, 2002; Meadows *et al.*, 2012). Dada la importancia y urgencia de los problemas que se enfrentan, la sociedad comprometida debe controlar a los gobernantes y a las empresas y presionar para que se dediquen menos recursos para armas y conflictos, se combata la corrupción y la excesiva especulación financiera, y se fijen prioridades para que con la ayuda de la ciencia y la tecnología todos los habitantes accedan a educación, salud, trabajo digno y dieta saludable, se utilicen tecnologías productivas y energéticas amigables con el ambiente, se mejore la eficiencia final de uso energético, se reduzcan las demandas superfluas de alimentos, bienes y servicios, se reparen los productos, y se reciclen y reutilicen los residuos y desechos, entre otras acciones (Monckeberg, 1993; Raskin *et al.*, 2002; Ripple *et al.*, 2017; Lancet Commissions, 2019; Balzani, 2019). Estos objetivos están alineados con las metas para el desarrollo sustentable establecidas por las Naciones Unidas. Los cambios en los patrones de consumo y producción son impulsados por la comprensión de que ser no es tener y que el bienestar no es consumir

(Schopenhauer, 1851). En términos más generales, y basándonos en los sabios pensamientos de Gandhi, la sociedad debe resistir la política sin principios, la riqueza sin trabajo, los negocios sin moral, la ciencia sin humanidad, el consumo sin compromiso. De una sociedad comprometida surgirán gobernantes, empresarios, científicos y educadores comprometidos.

Quizá todo dependa en última instancia de la naturaleza de las personas. Mucho se ha escrito acerca de la naturaleza egoísta y violenta versus la naturaleza colaborativa del ser humano. Se ha afirmado que nace egoísta (Dawkins, 1976) o que nace bueno y el entorno social lo corrompe (Rousseau, 1762). En concordancia, Spencer (1864) introdujo el concepto de la supervivencia del más apto que fue utilizado para justificar los excesos del capitalismo. Contrariamente, otras visiones rescatan la naturaleza cooperativa del ser humano, pero basada en el interés personal, con resultados favorables para el grupo al que pertenece y para el establecimiento de organizaciones complejas (Wright, 2001). Estos conceptos están resumidos en Moscardi (2003). Pero más recientemente, Tomasello *et al.* (2005), basado en experimentos con niños muy pequeños, concluyen que la intencionalidad por cooperar es un móvil intrínseco de nuestra especie para trabajar en confianza, tolerancia y respeto en pos de un propósito común. Dicha intencionalidad se basa en procesos psicológicos exclusivos del ser humano que resultan en una evolución cultural y en la creación de instituciones sociales con normas y reglas ampliamente aceptadas (Tomasello, 2010). Poseemos entonces inclinación natural para colaborar y establecer objetivos comunes basada en un conjunto de habilidades cooperativas y motivaciones. De esta cooperación resulta un beneficio mutuo (Felber, 2014) funcional a la generación de prosperidad y equidad. La capacidad de colaboración tiene la contracara de la competencia y, como se discute más adelante, la educación tiene un rol en el balance entre ambas propiedades. En la producción agropecuaria, no obstante, dado que la oferta de cada productor es insignificante en relación con la total y no afecta al vecino por no influenciar los precios, se evidencia mayor colaboración que en otras actividades como la industria.

La evolución de los procesos de innovación en el agro rescata la virtud de la cooperación. El primer modelo fue el de la ciencia que empuja y genera las innovaciones. Pero los conocimientos generados por la ciencia en el laboratorio o en la estación experimental no necesariamente resultan en innovaciones debido a la atenuación de los efectos de los factores individuales y la magnificación de las interacciones al subir en la escala de complejidad. Este modelo de innovación no contempla apropiadamente la realidad de la producción agropecuaria, que es mucho más compleja que lo que el laboratorio o el campo experimental pueden abarcar. En respuesta a estas limitaciones surge el segundo modelo de inno-

vación, motorizado por la demanda que tracciona. Pero si dicho proceso se centra en, o se limita a identificar demandas del medio o de la comunidad, sin prestar la debida atención a la investigación de calidad, es altamente probable que las soluciones lleguen tarde, sean inadecuadas, o no incluyan innovaciones radicales. En los últimos años comenzaron a desarrollarse nuevos enfoques de los procesos de innovación y cambio tecnológico que intentan superar las limitaciones y contradicciones indicadas. Surge así el concepto de modelo interactivo de innovación. Sintéticamente, este modelo se fundamenta en la articulación de investigación, extensión y comunidad para conformar sociedades que aprenden y se adaptan a través del sinergismo de la interacción entre actores, visiones y disciplinas. Este modelo requiere, por lo tanto, de investigación de calidad y extensión de calidad, y marca la importancia de generar ambientes participativos efectivos (Andrade *et al.*, 2018; Sadras *et al.*, 2020).

El progreso individual es necesario para descubrir y potenciar el conocimiento, pero no suficiente. Dado que los problemas que enfrentamos son complejos, solucionarlos requiere cooperación entre los individuos, organizaciones y naciones, además de aproximaciones multidisciplinarias.

La capacidad de ser altruistas y cooperar, la necesidad de comunicación, la tolerancia, la confianza y la empatía se expresan principalmente con los individuos que identificamos como integrantes de nuestro grupo, con el que poseemos un fuerte sentido de pertenencia (Tomasello, 2010; Nogués, 2018). Lo irónico del caso es que esa mentalidad de grupo para la colaboración también sea la causa de tantos sufrimientos y conflictos en el pasado y en el mundo actual. Los seres humanos nos unimos para realizar todo tipo de maldades habitualmente dirigidas contra los que no pertenecen al grupo. Una estrategia ampliamente utilizada por parte de líderes autoritarios es señalar a un enemigo común para lograr unidad y colaboración de sus dirigidos (Tomasello, 2010).

La colaboración fue decisiva desde los comienzos de la humanidad. Fue indispensable para la subsistencia de los grupos de recolectores-cazadores y también lo es para afrontar los grandes desafíos actuales.

¿Podría la humanidad conformar un gran grupo y así poner nuestras capacidades intrínsecas por innovar, cooperar y compartir al servicio de alcanzar las metas comunes indicadas en lo que respecta a satisfacer las necesidades de alimentos, cuidar el ambiente y erradicar la pobreza?

Hay fundamentos muy sólidos para sustentar y nutrir el concepto de que pertenecemos a un único gran grupo. En primer lugar, todos los habitantes del planeta estamos estrechamente emparentados tal como se explicó anteriormente (Sección 2.2). En

segundo lugar, habitamos un planeta común en serio riesgo de degradación por extralimitación en el uso de sus recursos y en el cual lo que cada uno de nosotros haga afectará a todos los demás (Capítulo 3). Somos entonces un único grupo que comparte la biósfera y enfrenta un destino común. Hoy más que nunca, lo crucial no es la supervivencia de los más aptos, sino la supervivencia conjunta resultante de la colaboración y del respeto por la vida, la diversidad y el hábitat (Hare y Woods, 2020).

Tenemos una asombrosa capacidad para la innovación y la colaboración que heredamos de nuestros ancestros. Pero tenemos que lograr focalizarlas en los nobles objetivos indicados. Debemos trabajar para instalar en todas las personas, instituciones y gobiernos la idea de un gran grupo que habita un único ambiente, que acepta a la vez la diversidad y que lucha contra enemigos comunes que son la degradación ambiental, el hambre y la pobreza. Es una tarea difícil teniendo en cuenta que, en la evolución de la humanidad a partir de aquellos recolectores-cazadores, la competencia, el rechazo y la intolerancia primaron entre las distintas culturas, religiones, clases, etnias y países. La educación será fundamental para lograrlo.

Las tecnologías en informática y en comunicaciones, que se han desarrollado de manera sorprendente en las últimas décadas alcanzando un nivel de desarrollo impensado pocos años atrás, pueden ser de gran utilidad para potenciar y direccionar nuestras capacidades innovadoras y colaborativas. Si la imprenta de Gutenberg aportó considerablemente al renacimiento de las ciencias, hoy son inimaginables los potenciales aportes de la informática y de la internet que concentran miríadas de conocimientos, todos los trabajos científicos, los escritos de difusión, las revisiones, y las obras de arte en la pantalla de la computadora, contribuyendo a i) potenciar el pensamiento creativo (Schopenhauer, 1851) y ii) interconectar los cerebros, forjando así círculos virtuosos de ideas, conocimientos e innovaciones.

Las nuevas técnicas de comunicaciones pueden además acercar a las personas y posiciones reduciendo confrontaciones e hipótesis de conflictos y contribuir al establecimiento de metas comunes en temas sociales y ambientales (Arébalos y Alonso, 2009). Un mundo íntimamente intercomunicado e interconectado tiene mayores posibilidades de colaborar, cooperar, generar confianza, llegar a acuerdos, y pertenecer a un gran grupo diverso.

En muchos pasajes de este libro se mencionó el tema de la educación. En su *Teoría del capital humano*, Theodore Schultz (1960) plantea a la educación como pilar del desarrollo económico y social, pues aumenta la productividad del trabajo, del capital y de los factores de producción en general. La educación tiene como objetivos desarrollar las habilidades cognitivas que resultan en

prosperidad individual, a través del impulso de la creatividad, el espíritu crítico, la independencia de criterio y la capacidad de resolver problemas. Pero debe contemplar además, desarrollar aquellas habilidades relacionadas con la prosperidad colectiva, que incluyen colaboración, complementación, empatía, tolerancia, respeto y diálogo (Russell, 1932; Balart Castro, 2016). Ambos tipos de habilidades son claves para que el modelo interactivo de innovación produzca los resultados deseables en cuanto a alcanzar una producción sostenible y erradicar la pobreza.

8. ESCENARIOS POSIBLES

Resulta difícil hacer predicciones fehacientes ante semejante complejidad y combinación de variables. No obstante, se pueden plantear posibles escenarios (Raskin *et al.*, 2002).

Un escenario futuro es que la economía de libre mercado se afiance y que los problemas que hoy nos acucian sean solucionados por la mano invisible del mercado (Smith, 1776; Raskin *et al.*, 2002) en la medida que se contemplen las externalidades derivadas de las acciones productivas de la sociedad. Sin embargo, por la relevancia y los riesgos de los problemas que enfrentamos, que pueden llegar a producir daños irreversibles que trascienden las leyes del mercado, y el hecho de que estas no aseguran ni garantizan un desarrollo social equitativo, se plantea un segundo escenario que incluye acciones y regulaciones de la economía (Keynes, 1936; Raskin *et al.*, 2002) que reflejen mayor compromiso de los gobiernos para preservar el ambiente y lograr más equidad social, sin que signifiquen un freno a la capacidad innovadora del ser humano. Estas regulaciones incluyen el establecimiento de impuestos a actividades con impactos socioambientales negativos, derivar fondos de los enormes recursos del sector militar y del mercado de valores no regulado y controlar las evasiones fiscales, para atender objetivos ambientales y sociales (Tian *et al.*, 2018; Kuhn *et al.*, 2018; Galaz *et al.*, 2018; Lawson *et al.*, 2019; Kayal *et al.*, 2019).

La resistencia por propios intereses de corto plazo y la ignorancia, miopía o complacencia de los integrantes de la sociedad ponen en duda la implementación y eficacia de estas acciones regulatorias (Raskin *et al.*, 2002). Las iniciativas positivas en esta dirección tienden a ser neutralizadas por acciones de organizaciones poderosas relacionadas con el negocio del petróleo, de las armas, o con otras actividades negativas desde el punto de vista socioambiental (Kayal *et al.*, 2019).

Si la mano invisible de la economía de mercado o las regulaciones de gobierno no son suficientes para morigerar o contrarrestar las amenazas a la sostenibilidad, los futuros escenarios serían de caos, pobreza, hambrunas y degradación en línea con lo que vaticinó Malthus, poniendo en serio peligro a la humanidad.

Algunos plantean como posibilidad el advenimiento de sociedades más desarrolladas que se fortifican intentando aislarse de la degradación de los países y sectores más desposeídos y marginados, y que se preparan para afrontar los peligros. Algunos gobiernos están tomando medidas en línea con este escenario poco sostenible.

En contraste con estas proyecciones, se presenta un escenario que consiste en la reafirmación y potenciación de movimientos, hoy incipientes, que alzan los principios de compromiso ambiental y social, lo que Raskin *et al.* (2002) denominan la Gran Transición. Las mejoras en comunicación y en interconexión pueden contribuir al establecimiento de una conciencia global de compromiso social y ambiental (Moscardi, 2003). Dicho compromiso encauza el conocimiento científico, la innovación interactiva y colaborativa, las decisiones políticas y las organizaciones relevantes para conformar un escenario virtuoso que se sustenta en la imperiosa necesidad de cambios sustanciales para enfrentar los grandes desafíos en relación con satisfacer las futuras demandas, revertir la degradación ambiental y erradicar la pobreza (Raskin *et al.*, 2002; Andrade *et al.*, 2018; Kayal *et al.*, 2019).

La pandemia del coronavirus desde comienzos del 2020 puso en jaque a la humanidad. Causó la muerte de 1,8 millones de personas en 2020, cambió drásticamente las costumbres y ocasionó una severa crisis económica por una marcada reducción de actividad productiva, social y comercial. Su efecto sobre la tasa de crecimiento poblacional sería mínimo. Las predicciones sobre futuras demandas de alimentos, sin embargo, se verían afectadas por las caídas en el poder adquisitivo, al menos a mediano plazo, y por la posible menor demanda de carne de animales confinados proclives a transmitir enfermedades a los humanos (y su sustitución por proteínas vegetales). Esto reduciría los futuros requerimientos de alimentos de calidad y de calorías totales para alimentación humana y animal. Las actividades más afectadas por la crisis son el transporte, la industria vehicular, la aeronáutica y el turismo, lo que resultaría en menores emisiones de gases de efecto invernadero. Se obtendrán en consecuencia datos a escala global de los efectos de la caída en el uso de combustibles fósiles y de la actividad económica sobre las emisiones y concentraciones de dichos gases en la atmósfera. Las actividades relacionadas con la alimentación, la salud, la educación y las comunicaciones fue-

ron menos afectadas. Aun así, por la gran crisis que desencadenó, la pandemia es un factor de incremento de la pobreza y de la desigualdad entre y dentro de los países que compromete aún más la seguridad alimentaria y el acceso a los alimentos de los más humildes. Podría además conducir, en el corto y mediano plazo, a un resurgimiento o fortalecimiento de políticas proteccionistas. Más allá de las serias consecuencias indicadas, esta grave situación puede aportarnos enseñanzas positivas. En primer lugar, la pandemia aceleró los procesos de conectar a las personas por medio de las modernas vías de comunicación, lo que bien canalizado promueve la innovación y la colaboración. Paradójicamente, el distanciamiento físico promovió un acercamiento social. En segundo lugar, tomamos mayor conciencia acerca de la fragilidad de la humanidad, lo que contribuiría a comprender la necesidad de una mirada global y de la búsqueda de soluciones en conjunto. La especie humana puede entonces salir de esta situación catastrófica con mayor resiliencia, más interconectados y con mayor disposición para la colaboración, y tener así mayores posibilidades de resolver los serios problemas que afronta.

Con respecto al escenario de la Gran Transición (Raskin *et al.*, 2002), mi intención no es instalar un optimismo ingenuo. Lo que predomina hoy y predominó en el pasado indica lo contrario, ya que se han impuesto la competencia y los intereses particulares de corto plazo, es escasa la consideración de los temas ambientales, priman las extralimitaciones en el uso de los recursos, y las brechas de desarrollo persisten. Las necesidades para un mundo social y ambientalmente sustentable, que reditúan a largo plazo, se contraponen con ideologías que representan formas radicales de individualismo y supervivencia del más apto (Thurow, 1996). La situación global actual es consecuencia de siglos de planificación sectorial sin cuidado ambiental. La ambición, la puja por el poder y la supervivencia del más fuerte pueden prevalecer (Spencer, 1864). En este caso, la humanidad tal como la conocemos está perdida. Mi intención es más bien remarcar que tenemos una oportunidad para resolver los grandes problemas comunes que enfrentamos basada en el potencial de innovación y en la predisposición natural a colaborar.

La Figura 5, con su amplia escala temporal de 50.000 años, representa fielmente la relevancia de la etapa que nos tocó vivir y la responsabilidad que nos compete, ya que la mayor parte del crecimiento de la población humana se produce entre la generación de nuestros abuelos y la de nuestros nietos. En este estrecho lapso de tiempo se produce también un crecimiento aún mayor de la producción de alimentos, del uso de energía, y del consumo en general, y hemos sido testigos de asombrosos cambios tecnológicos como el automóvil, el avión, la radio, la televisión, la com-

putadora personal, internet, y las comunicaciones satelitales, por nombrar unos pocos. Algunos denominan a estos hechos la “Gran Aceleración del Antropoceno”.

Desde sus orígenes, la humanidad estuvo repetidas veces en riesgo, pero nos sobrepusimos y pudimos seguir adelante gracias a nuestras características inherentes de innovación y colaboración. Hoy la humanidad vuelve a estar en riesgo porque nos acercamos a puntos de no retorno y muchos lo ignoran o no se dan cuenta. Pero, nuevamente, tenemos una oportunidad. Tenemos los medios para resolver los problemas. Investigar, encontrar patrones, innovar, desarrollar tecnologías, interactuar y colaborar, forman parte de nuestra naturaleza. A lo largo de estos capítulos se presentaron pruebas contundentes de estas propiedades humanas. Podemos cuestionar cómo hemos utilizado muchas de las innovaciones desarrolladas, pero la ciencia y la tecnología, junto con nuestra capacidad inherente de colaboración, nos pueden dar las soluciones. En este sentido, las tecnologías y conocimientos deben ser considerados y analizados con rigor científico, en función de sus potenciales aportes a los objetivos comunes indicados.

En este libro, se presenta una mirada amplia que quizá nos ayude a darle una real dimensión a los desafíos que enfrentamos, a ponerlos en contexto, a tomar mayor conciencia.

La humanidad es frágil. Un gran volcán, el choque de un meteorito, la explosión de una supernova, o algún otro fenómeno natural pueden causar la extinción de gran parte de la vida del planeta. Esto ya ocurrió cinco veces a lo largo de las eras geológicas. Pero además, la vida en el planeta está hoy amenazada por nuestras propias actividades humanas. Disponemos de las armas con el potencial para eliminar varias veces la población humana actual. Asimismo, la manera de producir y consumir bienes y servicios nos está acercando a puntos de no retorno en cuanto a degradación ambiental.

La prodigiosa capacidad de desarrollo tecnológico no deberían ser las causantes de los graves problemas para la humanidad, sino por el contrario, junto con la colaboración, deben aportar las soluciones a los desafíos que enfrentamos.

Las generaciones del futuro evocarán, como hacemos en esta obra, a los primeros humanos que cruzaron el mar Rojo, a los que comenzaron a cultivar la tierra, a los que protagonizaron el Renacimiento. También dirán que nosotros, las generaciones de los siglos XX y XXI, vivimos en una época de vertiginoso crecimiento y de estabilización poblacional, que extraíamos una sustancia oleosa oscura, gas y carbón de la tierra para quemarlos y obtener así la energía para mover o hacer funcionar nuestras máquinas, que para producir alimentos erosionábamos el suelo y aplicábamos productos químicos contaminantes.

Ojalá también puedan decir que logramos unirnos en causas comunes y que, valiéndonos del asombroso desarrollo tecnológico y de nuestra capacidad de cooperación, garantizamos seguridad alimentaria a toda la población, aprendimos a utilizar energías limpias y renovables, supimos romper las asociaciones entre producción e impacto ambiental y entre crecimiento económico y desarrollo, y forjamos un mundo más equitativo y justo.

9. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este libro se presentó y discutió información sobre los albores del género *homo*, la dispersión de nuestra especie por el mundo, el origen de la agricultura, la instalación del método científico y las innovaciones en la agricultura, en la energía y en las comunicaciones. La población humana creció exponencialmente luego de los descubrimientos de Pasteur y Koch. La producción de alimentos satisfizo la creciente demanda con muestras asombrosas de capacidad de innovación. No obstante, el crecimiento exponencial de todas las actividades humanas y del uso de los recursos naturales en las últimas décadas, sumado a lo limitado de los bienes planetarios, causaron extralimitaciones con importantes efectos en la naturaleza. No estamos realizando una buena gestión de nuestro hábitat ni de los servicios ecosistémicos. Los efectos resultantes, como el calentamiento global, la degradación de suelos, la desertificación, la deforestación, la pérdida de biodiversidad, la contaminación y la escasez de agua azul, comprometen la futura seguridad alimentaria.

Con el apoyo de información obtenida de bases de datos de reconocidas instituciones y de trabajos científicos publicados en revistas de prestigio internacional y utilizando métodos respaldados por la literatura, se discutieron los efectos de la producción sobre el ambiente, se calcularon las futuras demandas de productos agrícolas, y se describieron las estrategias para satisfacerlas de manera sostenible.

Las demandas de productos agrícolas continuarán creciendo en las próximas décadas debido, principalmente, al aumento de la población y a los cambios en la calidad de la dieta de muchos habitantes. Las nuevas estimaciones indican que la demanda de alimentos aumentaría 47 % entre 2018 y 2050, aunque con grandes diferencias entre continentes.

La moderación de la dieta y la reducción de las pérdidas y desperdicios pueden modificar significativamente los volúmenes de alimentos demandados a futuro. Los aumentos de producción

requeridos no deberían basarse en la expansión de la superficie cultivada ya que esto resulta en pérdidas de biodiversidad y hábitats, emisiones de gases de efecto invernadero, excesos hídricos y exposición de tierras frágiles a procesos de degradación. En consecuencia, los mayores esfuerzos para incrementar la producción tienen que enfocarse en la intensificación del uso de la tierra. Pero esta no debe basarse primariamente en mayores usos de insumos, sino en estrategias que contemplen ciertas tecnologías duras, y sobre todo, de procesos y conocimientos, que permitan detener o revertir el deterioro de los suelos y la contaminación y hacer un uso más eficiente de los recursos e insumos. Entre estas se analizaron el mejoramiento genético, la biotecnología, el manejo de cultivos con bases ecofisiológicas, el manejo integrado de organismos perjudiciales, las buenas prácticas de aplicación de fertilizantes, las buenas prácticas en producción animal, las prácticas que conducen al uso eficiente del agua azul y verde, el incremento del número de cultivos por año y las producciones ecológicas.

El libro se focalizó en generar conciencia acerca de la necesidad de romper la asociación entre producción y degradación del ambiente. Tradicionalmente, la intensificación se asocia con una agricultura que causa mayor daño ambiental. Sin embargo, mayor producción agrícola y conservación de servicios ecosistémicos no necesariamente son mutuamente excluyentes. Existe compatibilidad entre sostenibilidad e intensificación a través de estrategias y tecnologías que propicien mayor productividad de los recursos e insumos, reducción del uso de insumos no renovables o contaminantes, rediseño de los sistemas de producción y mirada de paisaje.

Diferentes aproximaciones pueden alcanzar una mayor sostenibilidad de los agroecosistemas. En este escrito se engloban dentro del término intensificación sostenible. Toda tecnología potencialmente funcional a satisfacer futuras demandas y cuidar el ambiente debe ser considerada, analizada y evaluada con rigor científico. Las tecnologías deben ser pensadas de manera conjunta dentro de un sistema de producción, considerando las sinergias, las complementaciones y los posibles efectos compensatorios entre ellas, y sus interacciones con el ambiente.

En la edición anterior se fijaron objetivos productivos y ambientales para el periodo 2010-2050. En los años transcurridos a partir del año 2010, la producción de alimentos creció acorde a las proyecciones o incluso las superó. Contrariamente, las metas de reducción de impacto ambiental no se están cumpliendo a juzgar por el uso creciente de agroquímicos, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, la expansión del área cultivada, la degradación de suelos y la pérdida de biodiversidad. Esto debe incentivarlos a redoblar nuestros esfuerzos para alcanzar las elusivas metas ambientales.

Se indicaron, para el mundo y para cada continente, posibles combinaciones de estrategias y prácticas para cubrir las demandas del año 2050. De la información presentada surgen también las estrategias que se pueden utilizar en cuanto al objetivo de desacoplar la producción del impacto ambiental. La comparación de continentes reveló grandes diferencias en incremento de demanda, en la posibilidad de su regulación, en oferta potencial de alimentos y en efectos ambientales.

Las otras actividades humanas como la industria, el transporte y las domésticas ocasionan daños al ambiente, que en el caso del calentamiento global es mucho más severo que el debido a la agricultura. Por lo tanto, es necesario hacer un uso más eficiente de la energía, los materiales y los bienes y servicios en general, moderar y regular las demandas, y utilizar fuentes de energías y materiales renovables.

La pobreza es la principal causa de la desnutrición y de la inseguridad alimentaria. En las últimas décadas, el mundo ha hecho notables progresos en cuanto a la reducción de la pobreza extrema y la mejora de la nutrición, de la expectativa de vida y del nivel educativo de la población. Sin embargo, las mejoras en poder adquisitivo, dietas y otras variables de desarrollo humano difieren marcadamente entre regiones, países y dentro de cada país. El nivel de ingreso es muy deficiente en los países y sectores más pobres, y se encuentra por debajo del valor que asegura la satisfacción de necesidades básicas de la población. En consecuencia, y a pesar del asombroso potencial tecnológico y de las mejoras observadas, vivimos en un mundo despereado, con excluidos. La situación se agrava en algunas regiones por el cambio climático, el deterioro de los hábitats y los conflictos sociales. Los países y regiones más pobres son los que mayor desnutrición sufren, los que más crecen en población, los que menos aumentan sus ingresos, los que mayor impacto ambiental sufren, y los que menos capacidad de reacción tienen. Se enfatiza la necesidad de mejorar la nutrición y el nivel de vida de una importante fracción de la población mundial a través de estrategias y prácticas cuidadosas del ambiente. Un aspecto para resaltar es que con determinados niveles de poder adquisitivo se alcanzan las metas de desarrollo humano mientras que el consumo y su consecuente impacto ambiental continúan creciendo.

Gracias a nuestras capacidades inherentes de innovación y colaboración pudimos adaptarnos, progresar y conquistar los distintos y variados territorios del planeta. Valiéndonos de estas capacidades podemos también lograr los objetivos de satisfacer la demanda futura de productos agrícolas, reducir el daño a la naturaleza y eliminar la pobreza. El gran interrogante es si podremos hacerlo.

Si la protegemos, la innovación humana es inevitable, impredecible, acumulativa, exponencial y disruptiva. Nuestra capacidad tecnológica creciente no debe estar al servicio de los paradigmas del consumo, de los excesos y del descarte; no debe ser funcional a objetivos de corto plazo que responden a planificaciones sectoriales con ausencia de compromiso social y ambiental. La tecnología tiene que servir al bienestar de la población. Para esto, tenemos que canalizarla a través de una sólida estructura científico tecnológica, evitando posturas ambientalistas extremas que no valoran adecuadamente dicha capacidad innovadora, tanto como posiciones tecnocéntricas extremas que no toman total conciencia de que la tecnología no es neutra, sino que puede presentar riesgos, por lo que debe ser controlada y sus potenciales efectos estudiados.

Nuestras diversas acciones no deben considerarse aisladas, sino en un marco de adecuada gobernanza y claros compromisos. Alcanzar las metas sustentables requerirá de políticas, incentivos y regulaciones adecuadas, inversiones en infraestructura, extensión y transferencia, monitoreo ambiental, desarrollo de indicadores claros, precisos y efectivos, cambios organizacionales, y, sobre todo, vigorosos esfuerzos por la educación y la capacitación de la población en materia de sostenibilidad.

Satisfacer las futuras demandas, aliviar la presión sobre el delicado ambiente y erradicar la pobreza requieren esfuerzos no solo de las personas involucradas en la ciencia y la innovación, sino de toda la sociedad en su conjunto. Nuestras aproximaciones deben ser, además, multidisciplinarias e integradoras ya que los problemas que enfrentamos son sistémicos y complejos.

De nuestra inclinación natural para colaborar puede resultar prosperidad y equidad. La capacidad de cooperar se expresa principalmente con los individuos que identificamos como integrantes de nuestro grupo, con el que poseemos un fuerte sentido de pertenencia. Hay, no obstante, fundamentos sólidos para sustentar y nutrir el concepto de que la humanidad constituye un único gran grupo. Tenemos un mismo origen, compartimos la biósfera y enfrentamos un destino común. Hoy más que nunca, lo crucial no es la supervivencia de los más aptos o fuertes, sino la supervivencia conjunta resultante de la colaboración.

La educación, además de desarrollar las habilidades cognitivas que resultan en prosperidad individual, tiene que promover aquellas habilidades relacionadas con la prosperidad colectiva. Ambos tipos de habilidades son claves para que el modelo interactivo de innovación produzca los resultados deseables en cuanto a alcanzar una producción sostenible y erradicar la pobreza. Las mejoras en comunicación y en interconexión pueden contribuir al establecimiento de una conciencia global de compromiso social y ambiental

La prodigiosa capacidad de desarrollo tecnológico no deberían ser las causantes de los graves problemas para la humanidad, sino por el contrario, junto con la colaboración, deben aportar las soluciones a los desafíos que enfrentamos. Hacer ciencia y desarrollar tecnologías forman parte de nuestra naturaleza, no podemos volver atrás. Frente a este magnífico potencial de nuestra especie, resultan incomprensibles el hambre, la pobreza y la degradación ambiental que hoy sufrimos. Tenemos que lograr que los productos derivados de la capacidad de innovar y crear estén al servicio del bienestar de toda la población. Debemos lograrlo por los que comenzaron a tallar la piedra, por los que controlaron el fuego, por los primeros agricultores, por los tantos que se han sacrificado y esforzado por un mundo mejor y, sobre todo, por las personas que hoy sufren carencias y las tantas más que las sufrirán en el futuro si no actuamos adecuadamente.

10. REFERENCIAS

- Aapresid. 2016. Sistemas Chacras Pergamino. Hacia una producción sustentable real. Resumen resultados 2011-2016. Sistemas Chacras Aapresid.
- Abbate, P.; F. Andrade. 2015. Capítulo 6. Los nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento de los cultivos de granos. En: Echeverría, H.; F. García (Eds.). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ediciones INTA. 155-185 pp.
- Abbate, P.; J. Dardanelli; M. Cantarero; E. Suero. 2004. Climatic and water availability effects on water use efficiency in wheat. *Crop Sci.* 44: 474-483.
- Abbo, S.; A. Gopher. 2017. Near eastern plant domestication: A history of thought. *Trends in Plant Science* 22: 491-511.
- Abbo, S.; A. Gopher. 2020. Plant domestication in the Neolithic Near East: The humans-plants liaison. *Quaternary Science Reviews* 242: 106412.
- Abrol, I.; J. Yadav; F. Massoud. 1988. Salt affected soils and their management. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). *Soils Bulletin* 39.
- Acquaah, G. 2007. Principles of plant genetics and breeding. Blackwell Eds. Malden, MA. EUA. 569 p.
- Acquaah, G. 2012. Principles of plant genetics and breeding. 2nd Edition. Wiley-Blackwell. 758 p.
- Agusdei, M. 2013. Rol de la ecofisiología en el diseño de manejos especializados de pasturas. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal* 21: 63-78.
- Agosti, M.; A. Ruiz; F. Accame; R. Gil. 2020. Chacra Pergamino. Informe final 2011-2020. Aapresid. 234 p.
- Aguirrezábal, L.; P. Martre; G. Irujo; N. Izquierdo; V. Allard. 2009. Chapter 16. Management and breeding strategies for the improvement of grain and oil quality. En: Sadras, V. D. Calderini (Eds.). *Crop Physiology. Applications for genetic improvement and agronomy*. Academic Press. Elsevier. Ámsterdam.

- Aguirrezábal, L.; F. Andrade. 1998. Calidad de productos agrícolas. Bases ecofisiológicas, genéticas y de manejo agronómico. Unidad Integrada Balcarce INTA, FCA UNMP. 315 p.
- Agus F.; J. Andrade; J. Rattalino Edreira; N. Deng; D. Purwantomo; N. Agustiani; V. Aristya; S. F. Batubara; H. Hosang; L. Krisnadi; A. Makka; N. Cenacchi; K. Wiebe; P. Grassini. 2019. Yield gaps in intensive rice-maize cropping sequences in the humid tropics of Indonesia. *Field Crops Res.* 237: 12-22.
- Alalwan, H.; A. Alminshid; H. Aljaafari. 2019. Promising evolution of biofuel generations. Subject review. *Mechanical Renewable Energy Focus* 28: 127-139.
- Al-Babili, S.; P. Beyer. 2005. Golden Rice. Five years on the road, five years to go? *Trends Plant Sci.* 10: 565-573.
- Alexander, P.; A. Reddy; C. Brown; R. Henry; M. Rounsevell. 2019. Transforming agricultural land use through marginal gains in the food system. *Global Environmental Change* 57: 101932.
- Alexandratos, N.; J. Bruinsma. 2012. World agriculture towards 2030/2050. The 2012 revision. ESA working paper N.º 12-03. FAO. Roma.
- Allard, R. 1999. Principles of plant breeding. J. Wiley. Hoboken, NJ. EUA. 264 p.
- Altieri, M. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74: 19-31.
- Altieri, S. 1994. Bases agroecológicas para una producción agrícola sustentable. *Agricultura Técnica* 54: 371-386.
- Alvarez, C.; A. Quiroga; D. Santos; M. Bodrero. 2013. Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción. Ediciones INTA. 198 p.
- Alvarez, C.; M. Taboada; S. Perelman; H. Morrás. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampas, Argentina. *Soil Research* 52: 533-542.
- Alvarez, C.; C.R. Alvarez; A. Costantini; M. Basanta. 2014. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). *Soil and Tillage Research* 142: 25-31.
- Alvarez, R.; M. Russo; P. Prystupa; J. Scheiner; L. Blotta. 1998. Soil carbon pools under conventional and no-tillage systems in the Argentine Rolling Pampa. *Agron. J.* 90: 138-143.
- Alvarez, R.; H. Steinbach; J. De Paepe. 2017. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Field Crops Res.* 170: 53-65.
- Ambrose, S. 1998. Late Pleistocene human population bottlenecks, volcanic winter, and differentiation of modern humans. *Journal of Human Evolution* 34: 623-651.
- Ambrose, S. 2001. Paleolithic technology and human evolution. *Science* 291: 1748-1753.
- Andeweg, K.; A. Reisinger. 2016. Reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero de la ganadería: Mejores prácticas y opciones emergentes. Agricultural Greenhouse Gas Research Centre. Nueva Zelanda. 41 p.
- Andrade, F. 1998. Posibilidades de expansión de la producción agrícola. *Interciencia.* 23: 218-226.
- Andrade, F. 2009. Eficiencia de uso de los nutrientes y rol de la nutrición en la producción de los cultivos. Actas Simposio Fertilidad. IPNI, Fertilizar. En: García, F.; I. Ciampitti (Eds.). Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de los cultivos. Actas Simposio Fertilidad. Fertilizar, IPNI. Rosario. 124-130 pp.

- Andrade, F. 2012. Contribuciones de la Ecofisiología de Cultivos a la producción agrícola. *Anales de la Academia Nacional Agronomía y Veterinaria* 66: 345-377.
- Andrade, F. 2016a. Los desafíos de la agricultura 1.ª Edición. International Plant Nutrition Institute. 136 p.
- Andrade, F.; M. Ferreiro. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Res.* 48: 155-165.
- Andrade, F.; V. Sadras. 2002a. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja, INTA Balcarce, Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP, Buenos Aires, Argentina. 450 p.
- Andrade, F.; V. Sadras. 2002b. Capítulo 7. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Andrade, F. V. Sadras (Eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Facultad de Ciencias Agrarias UNMP, INTA.
- Andrade, F.; P. Abbate. 2005. Response of maize and soybean to variability in stand uniformity. *Agron J.* 97: 1263-1269.
- Andrade, F.; O. Caviglia. 2015. Incrementando la productividad de los recursos. Productividad del agua. Actas IV Simposio Nacional de Agricultura, Uruguay. Paysandú, 123-130 pp.
- Andrade, F.; C. Cirilo; S. Uhart; M. Otegui. 1996. Ecofisiología del Cultivo de Maíz. Editorial La Barrosa. Dekalb Press. 292 p.
- Andrade, F.; C. Vega; S. Uhart; A. Cirilo; M. Cantarero; O. Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39: 453-459.
- Andrade, F.; H. Echeverría; N. Gonzalez; S. Uhart. 2002a. Capítulo 8. Requerimientos de nutrientes minerales. En: Andrade, F. V. Sadras (Eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Facultad de Ciencias Agrarias UNMP, INTA.
- Andrade, F.; P. Calviño, A. Cirilo; P. Barbieri. 2002b. Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception. *Agron J.* 94: 975-980.
- Andrade, F.; V. Sadras; C. Vega; L. Echarte. 2005. Physiological determinants of crop growth and yield. Applications to crop management and modeling. *Journal of Crop Improvement* 14: 51-101.
- Andrade, F.; P. Abbate; M. Otegui; A. Cirilo; A. Cerrudo. 2010. Ecophysiological basis for crop management. *The Americas Journal of Plant Science & Biotechnology* 4: 23-34.
- Andrade, F.; R. Sala; A. Pontaroli; A. León; S. Castro. 2015. Capítulo 19. Integration of biotechnology, plant breeding and crop physiology. Dealing with complex interactions from a physiological perspective. En: Sadras, V.; D. Calderini (Eds.). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. 2nd Edition.. Academic Press. Elsevier.
- Andrade, F.; M. Taboada; D. Lema; N. Maceira; H. Echeverría; G. Posse; D. Prieto; E. Sánchez; D. Ducasse; M. Bogliani; J. Gamundi; E. Trumper; J. Frana; E. Perotti; F. Fava; M. Mastrángelo. 2017. Los desafíos de la agricultura argentina. Satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental. Ediciones INTA. 120 p.
- Andrade, F.; J. Elverdín; E. Bedascarrasbure; D. Ramilo. 2018. La innovación. En: Ligier H.D.; G. Bravo (Comp.). *PRET: guía de Referencia para Proyectos Regionales con Enfoque Territorial*. 1.a ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Ediciones INTA. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 175-178 pp.
- Andrade, J. 2016b. Intensificación de los sistemas de producción de granos en la región pampeana: productividad y uso de recursos. Tesis doctoral. Escuela para Graduados Facultad de Agronomía UBA. 146p.

- Andrade, J.; E. Satorre. 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Res.* 177: 137-147.
- Andrade, J.; A. Cerrudo; R. Rizzalli; J. Monzon. 2012. Sunflower–soybean intercrop productivity under different water conditions and sowing managements. *Agron. J.* 104: 1049-1055.
- Andrade, J.; S. Poggio; M. Ermácora; E. Satorre. 2015. Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European J. of Agron.* 67: 37-51.
- Angus, J.; P. Grace. 2017. Nitrogen balance in Australia and nitrogen use efficiency on Australian farms. *Soil Research* 55: 435-450.
- Anthony, D. 2007. *The horse, the wheel, and language: how Bronze-Age riders from the Eurasian steppes shaped the modern world.* Princeton, NJ: Princeton University Press. 67 p.
- Aparicio, V.; J. Costa; M. Zamora. 2008. Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina. *Agricultural Water Management* 95: 1361-1372.
- Aparicio, V.; E. De Gerónimo; D. Marino; J. Primost; P. Carriquiriborde; J. Costa. 2013. Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins. *Chemosphere* 93: 1866-1873.
- Aparicio, V.; E. De Gerónimo; K. Hernández Guijarro; D. Pérez; R. Portocarrero; C. Vidal. 2015. Los plaguicidas agregados al suelo y su destino en el ambiente. INTA Ediciones. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 74 p.
- Aparicio, V.; M. Zamora; A. Barbera; M. Castro-Franco; M. Domenech; E. De Gerónimo; J. Costa. 2018. Industrial agriculture and agroecological transition systems: A comparative analysis of productivity results, organic matter and glyphosate in soil *Agricultural Systems* 167: 103-112.
- Aquastat. 2019. Food and Agriculture Organization, AQUASTAT. (Disponible: www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/index2.stm). Noviembre 2019.
- Aramburu Merlos, F.; J. Monzon; F. Andrade; P. Grassini. 2015a. Rendimientos potenciales y brechas de rendimiento. *Visión Rural* 107: 24-28.
- Aramburu Merlos, F.; J. Monzon; J. Mercau; M. Taboada; F. Andrade; A. Hall; E. Jobbagy; K.G. Cassman; P. Grassini. 2015b. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research* 184: 145-154.
- Arébalos, A.; G. Alonso. 2009. *La revolución horizontal.* Ediciones B. Buenos Aires.
- Aristide, P. 2019. Investigación para el desarrollo de indicadores de intensificación sostenible. Informe final. Prociur. 54 p.
- Aristide, P.; E. Cittadini; O. Blumetto; B. Giobellina; S. Ledesma; C. Ovalle, R. Marchao; P. Caballero; A. Osman; P. Tittonell. 2020. Variables claves para la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios. Hacia un sistema de indicadores de intensificación sostenible en el cono sur. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Montevideo, Uruguay. 18 p.
- Arriagada, C. 2000. Pobreza en América Latina: Nuevos escenarios y desafíos de políticas para el hábitat urbano. Series medio ambiente y desarrollo n.º 27. Naciones Unidas. Cepal. Santiago de Chile.
- Ashton, T. 1948. *The Industrial Revolution (1760-1830).* Oxford University Press. Oxford. 1997.
- Balart Castro, P. 2016. *Invertir en educación en un mundo globalizado.* Editorial RBA Barcelona. 142 p.

- Balzani, V. 2019. Saving the planet and the human society: renewable energy, circular economy, sobriety. *Substantia* 3 Suppl. 2: 9-15.
- Bakker, T.M. 1985. Eten van eigen bodem, een modelstudie. Proefschriften uit het LEI n.01. PhD-dissertation. LEI-DLO, The Hague. Países Bajos. 137 p.
- Bao, J. 2019. Chapter 14. Biotechnology for rice grain quality improvement. p 443-471. En; Bao, J. (Ed). *Rice* (Fourth Edition). Chemistry and Technology. AACC International. Elsevier Inc. 443-471 pp.
- Barbier, E.; J. Hochard, 2018. Land degradation and poverty. *Nat. Sustain.* 1: 623-631.
- Barbieri, P.; H. Sainz Rozas; H. Echeverría; F. Andrade. 2008. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. J.* 100: 1094-1100.
- Barlow, J.; G. Lennox; T. Gardner. 2016. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature* 535: 144-147.
- Barnosky, A.; N. Matzke; S.Tomiya; G. Wogan; B. Swartz; T. Quental; C. Marshall; J. McGuire; E. Lindsey; K. Maguire; B. Mersey; E. Ferrer. 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471: 51-57.
- Barral, P.; J. Rey Benayas; P. Meli; N. Maceira. 2015. Quantifying the impacts of ecological restoration on biodiversity and ecosystem services in agro-ecosystems: A global meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 202: 223-231.
- Bhatnagar, S.; R. Kumari. 2013. Bioremediation: a sustainable tool for environmental management. A review». *Annual Research and Review in Biology* 3: 974-993.
- Bedmar, F. 2011. ¿Qué son los plaguicidas? *Ciencia hoy* 21: 10-16.
- Bedmar, F.; J. Eyherabide; E. Satorre. 2002. Capítulo 10. Bases para el manejo de malezas. En: Andrade, F.; V. Sadras (Eds.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Unidad Integrada INTA Balcarce FCA UNMP.
- Bellis, M. 2010. The Agricultural Revolution. Introduction to the Agricultural Revolution. About.com Guide. (Disponible: <http://inventors.about.com/od/indrevolution/a/AgriculturalRev.htm>). Octubre 2016.
- Bhagwati, J. 2004. *In Defense of Globalization*. Oxford University Press. Oxford, Nueva York.
- Blankenship, R. 2008. *Molecular mechanisms of photosynthesis* (2nd ed). John Wiley & Sons Inc.
- Blechl, A.; Q. Hung; O. Anderson. 1998. Engineering changes in wheat flour by genetic engineering. *J. Plant Physiol.* 152: 703-707.
- Bologna, M.; G. Aquino. 2020. Deforestation and world population sustainability: a quantitative analysis. *Sci Rep* 10: 7631-7639.
- Bonan, G. 2008. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320: 1444-1449.
- Bonelli, L. 2014. Rendimiento potencial de maíz en Balcarce en función de la fecha de siembra y la duración de ciclo del híbrido. Tesis Magister Scientiae. UNMP. 85 p.
- Bonny, S.; G. Gardner; D. Pethick; J. Hocquette. 2017. Artificial meat and the future of the meat industry. *Animal Production Science* 57: 2216-2223.
- Boote, K.; J. Jones; J. Mishoe; R. Berger. 1983. Coupling pests to crop growth simulators to predict yield reductions. *Phytopathology* 73: 1581-1587.
- Borlaug, N. 2007. Sixty-two years of fighting hunger: personal recollections. *Euphytica* 157: 287-297.

- Borrelli, P. 2001. Capítulo 5. Producción animal sobre pastizales naturales. En: P. Borrelli, P.; G. Oliva (ed.). Ganadería Sustentable en la Patagonia Austral. INTA Reg. Pat. Sur. 129-160 pp.
- Borrelli, P.; D. Robinson; L. Fleischer; E. Lugato; C. Ballabio; C. Alewell; K. Meusburger; S. Modugno; B. Schütt; V. Ferro; V. Bagarello; K. Van Oost; L. Montanarella; P. Panagos. 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat Commun* 8, #2013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Bouwman, L.; K. Goldewijk; K. Van der Hoek; A. Beusen; D. Van Vuuren; J. Willems, M.; Rufino; E. Stehfest. 2011. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 110: 20882-20887.
- Bressani, R. 1991. Protein quality of high lysine maize for humans. *Cereal Foods World* 36: 806-811.
- Bringezu, S.; M. O'Brien; W. Pengue; M. Swilling; L. Kauppi. 2010. Assessing global land use and soil management for sustainable resource policies. Scoping Paper. International Panel for Sustainable Resource Management. UNEP.
- Brook, B.; N. Sodhi; C. Bradshaw. 2008. Synergies among extinction drivers under global change. *Trends in ecology & evolution* 23: 453-460.
- Brookes, G.; O. Barfoot. 2013. GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2011. 191 p.
- Bruinsma, J. 2009. The Resource Outlook to 2050: By how much do land, water, and crop yields need to increase by 2050? Paper presented at the FAO Expert Meeting, 24-26 June 2009, Rome on "How to Feed the World in 2050".
- Bruulsema, T.; P. Fixen; G. Sulewski. 2012. 4R Plant Nutrition Manual: A Manual for Improving the Management of Plant Nutrition. (eds.). International Plant Nutrition Institute (IPNI). Norcross, GA, EUA.
- Buringh, P.; R. Dudal. 1987. Agricultural land use in space and time. En: Wolman, M.G.; F.G.A. Fournier (ed.). *Land agriculture*. Fournier. John Wiley and Sons, Nueva York, EUA.
- Butler, D. 2010. The growing problem. *Nature* 466: 546-547.
- Byerlee, D.; J. Stevenson; N. Villoria. 2014. Does intensification slow crop land expansion or encourage deforestation? *Global Food Security* 3: 92-98
- Caldwell, J.; T. Schindlmayr. 2002. Historical population estimates: Unraveling the consensus. *Population and development review* 28: 183-204.
- Calleija, M.; S. Sukkarieh. 2018. Automatic target recognition and management system. US Patent App. 15/579,636.
- Calviño, P.; F. Andrade; V. Sadras. 2003. Maize Yield as Affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agron. J.* 95: 275-281.
- Cano, M. 2011. Interacción de microorganismos benéficos em plantas: Micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. Una revisión. *Rev. UDCA Act. & Div. Cient.* 14: 15-31.
- Cantagallo, J.; C. Chimenti; A. Hall. 1997. Number of seeds per unit area in sunflower correlates well with a photothermal quotient. *Crop Sci.* 37: 1780-1786.
- Caparrós, M. 2014. El hambre. Editorial Planeta. 610 p.
- Casanave Ponti, S. 2021. Emisiones de oxido nitroso en sistemas agrícolas con diferente nivel de intensificación en el sudeste pampeano. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Mar del Plata. 91 p.

- Casanave Ponti, S.; C. Videla; M. Monterubbianesi; F. Andrade; R. Rizzalli. 2020. Crop intensification with sustainable practices did not increase N₂O emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 292: 106828.
- Cassman, K.; P. Grassini. 2020. A global perspective on sustainable intensification research. *Nature sustainability* 3: 262-268.
- Cassman, K.; A. Doberman; D. Walters. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency and nitrogen management. *Ambio* 2: 132-140.
- Cassman, K.; A. Doberman; D. Walters; H. Yang. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 28: 315-358.
- Cassman, K.; P. Grassini; J. Van Wart. 2010. Crop yield potential, yield trends and global food security in a changing climate. En: Illel, D.; C. Rosenzweig (Eds.). *Handbook of Climate Change and Agroecosystems: Impacts, Adaptation, and Mitigation*. World Scientific. 37-51 pp.
- Castro, S. 2013. Estabilidad de rendimiento y mecanismos ecofisiológicos asociados con la fijación de granos en híbridos de maíz y en sus líneas parentales. Tesis de Magister Scientiae, UNMP.
- Cattivelli, L.; F. Rizza; F. Badeck; E. Mazzucotelli; A. Mastrangelo; E. Francia; C. Marè; A. Tondelli; A. Stanca. 2008. Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Res.* 105: 1-14.
- Cavalli-Sforza, L.; M. Feldman 2003. The application of molecular genetic approaches to the study of human evolution. *Nature Genetics* 33: 266-275.
- Caviglia, O.; F. Andrade. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas. Capture and use efficiency of environmental resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3:1-8.
- Caviglia, O.; V. Sadras; F. Andrade. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean. *Field Crops Res.* 87: 117-129.
- Caviglia, O.; V. Sadras; F. Andrade. 2013. Modelling long-term effects of cropping intensification reveals increased water and radiation productivity in the south-eastern Pampas. *Field Crops Res.* 149: 300-311.
- Caviglia, O.; R. Rizzalli; J.P. Monzon; F. García; R. Melchiori; J. Martinez; A. Cerrudo; A. Irigoyen; P. Barbieri; N. Van Opstal; F. Andrade. 2019. Improving resource productivity at a crop sequence level. *Field Crops Research* 235: 129-141.
- Ceballos, G.; P. Ehrlich; A. Barnosky; A. García; R. Pringle; T. Palmer. 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances* 19: Vol. 1, n.o 5, e1400253.
- Cerrudo, A.; J. Monzon; J. Di Matteo; F. Aramburu; R. Rizzalli; F. Andrade. 2013. Manejo del cultivo de maíz en ambientes con restricciones hídricas. *Revista Técnica Aapresid. N.o 119. Maíz. Siembra Directa.* 15-20 pp.
- Chapman, S.; G. Hammer; D. Podlich; M. Cooper. 2002. Linking biophysical and genetic models to integrate physiology, molecular biology and plant breeding. En: Kang, M.S. (Ed.). *Quantitative genetics, genomics and plant breeding*. CAB International, Wallingford. 167-187 pp.
- Chartres, C.; S. Varma. 2010. Out of water. From abundance to scarcity and how to solve the world's water problems. FT Press. EUA.
- Cirilo, A.; F. Andrade. 1994. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Sci.* 34: 1039-1043.
- Cirilo, A.; M. Actis; F. Andrade; O. Valentinuz. 2011. Crop management affects dry-milling quality of flint maize kernels. *Field Crops Res.* 122:140-150.

- Cittadini, R. 2010. Cuando comer es un problema. Voces en el Fénix 1: 105-111.
- Coll, L.; A. Cerrudo; R. Rizzalli; J. Monzon; F. Andrade. 2012. Capture and use of water and radiation in summer intercrops in the south-east Pampas of Argentina. *Field Crops Res.* 134: 105-113.
- Colombo, C.; S. Sarandón. 2015. Relevamiento de la utilización de agroquímicos en la provincia de Buenos Aires. Mapa de situación e incidencia sobre la salud. Defensor del pueblo, provincia de Buenos Aires. Universidad Nacional de La Plata. 532 p.
- Connor, D. 2008. Organic agriculture cannot feed the world. *Field Crops Res.* 106: 187-190.
- Connor, D. 2013. Organically grown crops do not a cropping system make and nor can organic agriculture nearly feed the world. *Field Crops Res.* 144: 145-147.
- Connor, D. 2018a. Land required for legumes restricts the contribution of organic agriculture to global food security. *Outlook on Agriculture* 47: 277-282.
- Connor, D. 2018b. Organic agriculture and food security: A decade of unreason finally implodes. *Field Crops Res.* 225: 128-129.
- Consoli, C. 2019. Bioenergy and carbon capture and storage. 2019 Perspective. Global CCS Institute. 13 p.
- Cook, J; S. Lewandowsky; U. Ecker. 2017. Neutralizing misinformation through inoculation: Exposing misleading argumentation techniques reduces their influence. *PLoS ONE* 12(5): e0175799.
- Correa, D.; H. Beyer; J. Fargione; J. Hill; H. Possingham; S. Thomas-Hall; P. Schenk. 2019. Towards the implementation of sustainable biofuel production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 107: 250-263.
- Correndo, A.; M. Boxler; F. García. 2012. Oferta hídrica y respuesta a la fertilización en maíz, trigo y soja en el norte de la región pampeana argentina. XXIII Congreso Argentino de La Ciencia del Suelo. Mar del Plata Argentina.
- Costa, J.; V. Aparicio; A. Cerda. 2015. Soil physical quality changes under different tillage management systems after 10 years in Argentinean Humid Pampa. *Solid Earth* 6: 361-371.
- Courty, M.; H. Weiss. 1997. The scenario of environmental degradation in the Tell Leilan region, Ne Syria, during the late Third Millennium abrupt climate change. En: Dalfes H.N.; G. Kukla; H. Weiss H. (Eds.). *Third Millennium BC Climate Change and Old World Collapse*. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change), vol 49. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Creus, C.; M. Bazzalo; M. Grondona; F. Andrade; A. León. 2007. Disease expression and ecophysiological yield components in sunflower isohybrids with and without *Verticillium dahliae* resistance. *Crop Sci.* 47:703-710.
- Crystal, D. 1987. *The Cambridge Encyclopedia of Language*. Cambridge University Press. 472 p.
- Cui, Z.; H. Zhang; Z. Dou. 2018. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. *Nature* 555: 363-366.
- D'Acunto, L.; J. Andrade; S. Poggio; M. Semmartin. 2018. Diversifying crop rotation increased metabolic soil diversity and activity of the microbial community. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 257: 159-164.
- D'Amour, C.; F. Reitsma; G. Baiocchi; S. Barthel; B. Güneralp; K. Erb; H. Haberl; F. Creutzig; K. Seto. 2016. Future urban land expansion and implications for global croplands. *PNAS* 114: 8939-8944.
- Dainese M.; E. Martin; M. Aizen; M. Albrecht; R. Bommarco. 2019. A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances* 5: eaax0121.

- Darwin, C. 1859. *The origin of species*. Londres. John Murray.
- Datta, R., S. Tsai; P. Bonsignore; S. Moon; J. Frank. 1995. Technological and economic potential of polylactic acid and lactic acid derivatives. *FEMS Microbiology Reviews* 16: 221-231.
- Davidson, E.; A. de Araújo; P. Artaxo; J. Balch; I. Foster Brown; M. Bus-tamante; M. Coe; R. DeFries; M. Keller; M. Longo; J. William Munger; W. Schroeder; B. Soares-Filho; C. Souza; S. Wofsy. 2012. The Amazon basin in transition. *Nature* 481: 321-328.
- Davis, P.; S. Coleman. 1997. European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) feeding behavior and survival on transgenic corn containing CryIA(b) protein from *Bacillus thuringiensis*. *Journal of the Kansas Entomological Society* 70: 31-38.
- Dawkins, R. 1976. *The selfish gene*. Oxford University Press, 2nd edition. 352 p.
- De Janvry, A. 2010. Agriculture for development: new paradigm and options for success. *Agricultural Economics* 41 S1: 17-36.
- Della Maggiora, A.; J. Gardiol; A. Irigoyen. 2002. Capítulo 6. Requerimientos hídricos. En: Andrade, F. V. Sadras (Eds.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Facultad de Ciencias Agrarias UNMP, INTA.
- De Las Heras, L. 2010. *El libro y la lectura en la plena Edad Media*. Lebrija Digital. La Revista Cultural de Lebrija. Valid XHTML and CSS.
- De Long, C.; R. Cruse; J. Wiener. 2015. The soil degradation paradox: compromising our resources when we need them the most. *Sustainability* 7: 866-879.
- De Ponti, T.; B. Rijk; M. Van Ittersum. 2012. The crop yield gap between organic and conventional agriculture. *Agr. Syst.* 108, 1-9.
- De Santa Eduvigis, J. 2010. *Potencial de rendimiento y tolerancia a sequía en híbridos de maíz*. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias UNMP. 70 pp.
- Deikman, J.; M. Petracek; J. Heard. 2012. Drought tolerance through biotechnology: improving translation from the laboratory to farmers' fields. *Current Opinion in Biotechnology* 23: 243-250.
- Denison, R. 2012. *Darwinian agriculture: How understanding evolution can improve agriculture*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Dent, D. 1995. *Integrated pest management*. Chapman and Hall. Londres. 356 p.
- Diamond, J. 1997. *Guns, germs and steel: the fates of human societies*. W.W. Norton & Co. Nueva York. 480 p.
- Diaz, R.; R. Rosenberg. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321: 926-929.
- Diffenbaugh, N.; M. Burke. 2019. Global warming has increased global economic inequality. *PNAS*: 116: 9808-9813.
- Di Matteo, J.; J.M. Ferreyra; A. Cerrudo; L. Echarte; F. Andrade. 2016. Yield potential and yield stability of Argentine Maize hybrids over 45 years of breeding. *Field Crops Res.* 197: 107-116.
- Dimes, J.; D. Rodriguez; A. Potgieter. 2015. Capítulo 5. Raising productivity of maize-based cropping systems in eastern and southern Africa: Step wise intensification crops. En: Sadras, V.; D. Calderini (Eds.). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. 2nd Edition. Elsevier, Academic Press.
- Doberman, A. 2007. *Nutrient use efficiency. Measurement and management*. IFA. International workshop on fertilizer best management practices. Bruselas, Bélgica.

- Domínguez, G.; G. Studdert; H. Echeverría. 2005. Propiedades del suelo: efectos de las prácticas de manejo. p. 207-229 En: Echeverría, H.E.; F.O. García (eds.). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. 207-229 pp.
- Dorn, H. 1962. World population growth. An international dilemma. *Science* 135: 283-290.
- Dosio, G.; L. Aguirrezábal; F. Andrade; V. Pereyra. 2000. Solar radiation intercepted during seed filling and oil production in two sunflower hybrids. *Crop Sci.* 40: 1637-1644.
- Dresselhaus, M.; I. Thomas. 2001. Alternative energy technologies. *Nature* 414: 332-337.
- Dubos, R. 1985. Pasteur. Salvat Editores SA. Barcelona España. Carles Scribner's sons.
- Echeverría, H.; F. García. 2015. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ediciones INTA. 904 p.
- Edmeades, G. 2013. Progress in Achieving and Delivering Drought Tolerance in Maize. An Update. International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA). 39 p.
- Edmeades, G.; G. McMaster; J. White; H. Campos. 2004. Genomics and the physiologists: bridging the gap between genes and crop response. *Field Crop Res.* 90: 5-18.
- Eevers, N.; J. Whitex; J. Vangronsveld; N. Weyens. 2017. Bio and phytoremediation of pesticide-contaminated environments: A review. *Advances in Botanical Research* 83: 277-318.
- Egli, D.; W. Bruening. 2005. Shade and temporal distribution of pod production and pod set in soybean. *Crop Sci.* 45: 1764-1769.
- Ehrlich, P. 1975. The population bomb. Riversity Press. Massachussets. EUA.
- Eid, E.; S. Alrumman; A. El-Bebany; K. Fawy; M. Taher; A. Hesham; G. El-Shaboury; M. Ahmed.. 2019. Evaluation of the potential of sewage sludge as a valuable fertilizer for wheat (*Triticum aestivum* L.) crops. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26: 392-401.
- Elmore, R.; F. Roeth; R. Klein; S. Knezevic; A. Martin; L. Nelson; C. Shapiro. 2001. Glyphosate-resistant soybean cultivar response to glyphosate. *Agron. J.* 93: 404-407.
- Enard, W. 2011. FOXP2 and the role of cortico-basal ganglia circuits in speech and language evolution. *Current Opinion in Neurobiology* 21: 415-424.
- Enard, W.; M. Przeworski; S. Fisher; C. Lai; V. Wiebe; T. Kitano; A. Monaco; S. Paabo. 2002. Molecular evolution of FOXP2, a gene involved in speech and language. *Nature* 418: 869-872.
- Encíclica Laudato SI. 2015. Carta Encíclica del Padre Francisco sobre el cuidado de la casa común. La Santa Sede. Libreria Editrice Vaticana. 87 p.
- Energy 101. 2020. Energy101.org. (Disponible: <https://energy-101.org/topics/energy-sources/renewable-energy/>). Abril 2020.
- Epicuro. Siglo III a. C. En de Botton A. 2000. Las consolaciones de La filosofía. Taurus, España. 295 p.
- Erb, K.; C. Lauk; T. Kastner; A. Mayer; M. Theurl; H. Haberl. 2016. Exploring the biophysical option space for feeding the world without deforestation. *Nat Commun* 7, 11382. <https://doi.org/10.1038/ncomms11382>
- Ernout, A.; A. Vialatte; A. Butet; N. Michel; Y. Rantier; O. Jambon; F. Burel. 2013. Grassy strips in their landscape context, their role as new habitat for biodiversity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 166: 15-27.

- EU. 2015. The role of research in global food and nutrition security. Expo 2015 European Union Scientific Steering Committee. Fischler, F. Chairman. Doi: 10.2788/521449
- Evans, L. 1997. Adapting and improving crops: the endless task. *Phil Trans R. Soc. Lond. B.* 354: 901-906.
- Fageria, N.; V. Baligar. 2005 Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy* 88: 97-185.
- FAO. 2014. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. FAO Statistical Database. (Disponible: <http://www.fao.org/>). Junio. 2016.
- FAO. 2016. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. NU. 27 p.
- FAO. 2016b. El estado de los bosques en el mundo. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. NU. 35 p.
- FAO. 2017. The Future of Food and Agriculture Trends and Challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. 2018. Food and Agriculture Organization of the UN, International Fund for Agricultural Development, UNICEF, World Food Programme, WHO. The state of food security and nutrition in the world. Rome: Food and Agriculture Organization of the UN.
- FAO. 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. FAO Statistical Database. (Disponible: <http://www.fao.org/>). Julio 2020.
- Fedoroff, N.; D. Battisti; R. Beachy; P. Cooper; D. Fischhoff; C. Hodges; V. Knauf; D. Lobell; B. Mazur; D. Molden; M. Reynolds; P. Ronald; M. Rosegrant; P. Sanchez; A. Vonshak; J. Zhu. 2010. Radically Rethinking Agriculture for the 21st Century. *Science* 327: 833-834.
- Felber, C. 2014. La economía del bien común. 1.a ed. Paidós. Buenos Aires. 286 p.
- Fereres, E.; V. González-Dugo. 2009. Chapter 6. Improving productivity to face water scarcity in irrigated agriculture. En: Sadras, V.; D. Calderini (Eds.). *Crop physiology. Applications for genetic improvement and agronomy.* Academic Press. Ámsterdam.
- Fernández Quintanilla, C. 2015. Hacia el futuro: Aplicaciones de la agricultura de precisión y la robótica a la gestión de malezas. *Actas XXII Congreso Latinoamericano de Malezas. ALAM, ASACIM.* Buenos Aires, Argentina. 11-14 pp.
- Fernández, R. 2015. Las verdades más incómodas del cambio climático. *Ecología Austral* 25: 149-157.
- Fernández, R.; P. Rush; M. C. Plencovich. 2019. Agroecología y agricultura industrial: ¿dos culturas irreconciliables? *Rev. Facultad de Agronomía UBA* 39: 69-84.
- Ferrer, A. 1997. *Hechos y ficciones de la globalización*, Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires.
- Ferreya, J.M. 2015. Efectos del mejoramiento de maíz (1965-2010) sobre la eficiencia en el uso del nitrógeno. Tesis MSc. UNMP.
- Fischer, G. 2009. World Food and Agriculture to 2030/50: How do climate change and bioenergy alter the long-term outlook for food, agriculture and resource availability? Paper prepared for expert meeting on "How to Feed the World in 2050". FAO. Roma.
- Fischer, R. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci.* 105: 447-461.

- Fischer, R.; G. Edmeades. 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci* 50: 585-598.
- Fischer, R.; D. Connor. 2018. Issues for cropping and agricultural science in the next 20 years. *Field Crops Res.* 222: 121-142.
- Fischer, R.; D. Byerlee; G. Edmeades. 2009. Can technology deliver on the yield challenge to 2050? Paper prepared for expert meeting on "How to Feed the World in 2050." FAO, Roma.
- Fischer, T.; D. Byerlee; G. Edmeades. 2014. Crop yields and global food security. Will yield increase continue to feed the world? ACIAR Monograph N.o 158. Australian Centre for International Agricultural Research. Canberra. 634 p.
- Flannery, K. 1973 The origin of agriculture. *Annual Review of Anthropology* 2: 271-310.
- Foley, J.; R. DeFries; G. Asner; C. Barford; G. Bonan; S. Carpenter. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: 570-574.
- Foley, J.; N. Ramankutty; K. Brauman; E. Cassidy; J. Gerber; M. Johnston; N. Mueller; C. O'Connell; D. Ray; P. West; C. Balzer; E. Bennett; S. Carpenter; J. Hill; C. Monfreda; S. Polasky; J. Rockström; J. Sheehan; S. Siebert; D. Tilman; D. Zaks. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478: 337-342.
- Franzluebbers, A.; J. Sawchik; M. Taboada. 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190: 18-26.
- Gaarder, J. 1994. *El mundo de Sofía*. Ediciones Siruela. Madrid. 638 p.
- Gaitán, J.; M. Navarro; L. Tenti; M. Pizarro; P. Carfagno; S. Rigo. 2017a. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina. Ediciones INTA.
- Gaitán, J.; D. Bran; G. Oliva; F. Maestre; M. Aguiar; G. Buono; D. Ferrante; V. Nakamatsu; G. Ciari; J. Salomone; V. Massara; G. García Martínez. 2017b. Aridity and overgrazing have convergent effects on ecosystem structure and functioning in Patagonian rangelands. *Land Degradation & Development*. doi: 10.1002/ldr.2694
- Galanakis, C. 2019. *Saving Food*. Production, supply chain, food waste and food consumption. Academic Press. Elsevier.
- Galaz, V.; B. Crona; A. Dauriach; J. Jouffray; H. Österblom; J. Fichtner. 2018. Tax havens and global environmental degradation. *Nature Ecology & Evolution* 2: 1352-1357.
- Galloway, J.; J. Aber; J. Erisman; S. Seitzinger; R. Howarth; E. Cowling; J. Cosby. 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience* 53: 341-356.
- Galway-Witham, J.; C. Stringer. 2018. How did *Homo sapiens* evolve? Genetic and fossil evidence challenges current models of modern human evolution. *Science* 360: 1296-1298.
- Gapminder. 2020. (Disponibile: www.gapminder.org/data/). Julio 2020.
- García, R. 2006. *Sistemas complejos*. Editorial Gedisa S.A. Barcelona. España. 201 p.
- Garibaldi, L.; N. Pérez-Méndez; M. Garratt; B. Gemmill-Herren; F. Miguez; L. Dicks. 2019. Policies for Ecological Intensification of crop production. *Trends in Ecology & Evolution* 34: 282-286.
- Garland, G.; A. Edlinger; S. Banerjee; F. Degrune; M. van der Heijden. 2021. Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nature Food* 2: 28-37.
- Garnett, T.; M. Appleby; A. Balmford; I. Bateman; T. Benton; P. Bloomer; B.

- Burlingame; M. Dawkins; L. Dolan; D. Fraser; M. Herrero; I. Hoffmann; P. Smith; P. Thornton; C., Toulmin; S. Vermeulen; H. Godfray. 2013. Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. *Science* 341: 33-34.
- Gebbers, R.; V. Adamchuk. 2010. Precision Agriculture and Food Security. *Science* 327: 828-831.
- Gellings, C.; K. Parmenter. 2004. Energy efficiency in fertilizer production and use. En: Gellings, C.; K. Blok. (Eds.). *Efficient use and conservation of energy*. Encyclopedia of life support systems. UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, Reino Unido.
- Gerten, D.; H. Hoff; J. Rockström; J. Jägermeyr; M. Kummu; A. Pastor. 2013. Towards a revised planetary boundary for consumptive freshwater use: role of environmental flow requirements. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 5: 551-58.
- GFW. 2019. Global Forest Watch. World Resource Institute. (Disponible: <https://blog.globalforestwatch.org/data-and-research/>). Abril 2020.
- Gibbs, H.; J. Salmon, 2015: Mapping the world's degraded lands. *Appl. Geogr.*, 57: 12-21.
- GISTEMP Team. 2020. GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies. (Disponible: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>). Marzo 2020.
- Giuliano, G. 2007. Interrogar la tecnología. Algunos fundamentos para un análisis crítico. 1.a edición. Nueva Librería, Buenos Aires.
- Gliessman, S. 2002. Agroecología. Procesos ecológicos en agricultura sostenible. *Catie*. Turrialba. Costa Rica. 359 p.
- GPAFSN. 2016. Global Panel on Agriculture and Food Systems for Nutrition. Food systems and diets: Facing the challenges of the 21st century. Londres.
- Godfray, H.; J. Beddington; I. Crute; L. Haddad; D. Lawrence; J. Muir; J. Pretty; S. Robinson; S. Thomas; C. Toulmin. 2010. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 327: 812-818.
- Godfray, H.; P. Aveyard; T. Garnett; J. Hall; T. Key; J. Lorimer; R. Pierrehumbert; P. Scarborough; M. Springmann; S. Jebb. 2018. Meat consumption, health, and the environment. *Science* 361: 243.
- Goldewijk, K.; N. Ramankutty. 2004. Land cover change over the last three centuries due to human activities: The availability of new global data sets. *GeoJournal* 61: 335-344.
- Gordon, L.; V. Bignet; B. Crona; P. Henriksson; T. Van Holt; M. Jonell; T. Lindahl; M. Troell; S. Barthel; L. Deutsch; C. Folke; L. Haider; J. Rockström; C. Queiroz. 2017. Rewiring food systems to enhance human health and biosphere stewardship. *Environ. Res. Lett.* 12. 100201.
- Gordon Childe, V. 1978. Los orígenes de la civilización. Madrid: F.C.E.
- Gore, R. 1997. The dawn of humans. *National Geographic* 191:72-99.
- Goetz, A. 2000. Miserias del presente, riqueza de lo posible. Paidós, Buenos Aires, 155-1997 pp.
- Goudsblom, J. 1986. The human monopoly on the use of fire. Its origin and conditions. *Human Evolution* 1: 517-523.
- Govindjee; D. Krogmann. 2004. Discoveries in oxygenic photosynthesis (1727-2003): a perspective. *Photosynthesis Research* 80: 15-57.
- Grassini, P.; K. Cassman. 2012. High-yield maize with large net energy yield and small global warming intensity. *PNAS* 109: 1074-1079.
- Grassini, P.; K. Eskridge; K. Cassman. 2013. Distinguishing between yield advances and yield plateaus in historical crop production trends. *Nature Communications* 4: 2918.

- Green, R.; J. Krause; A. Briggs; S. Pääbo. 2010. A Draft Sequence of the Neanderthal Genome. *Science* 328: 710-722.
- Griggs, D.; M. Stafford-Smith; O. Gaffney; J. Rockström; M. Öhman; P. Shyam-sundar; W. Steffen; G. Glaser; N. Kanie; I. Noble. 2013. Policy: Sustainable development goals for people and planet. *Nature* 495: 305-307.
- Guo, J.; X Liu; Y. Zhang; J. Shen; W. Han; W. Zhang; P. Christie; K. Gouling; P. Vitousek; F. Zhang. 2010. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science* 327: 1008-1010.
- Gupta, A. 2004. Origin of agriculture and domestication of plants and animals linked to early Holocene climate amelioration. *Current Science* 87: 54-59.
- Gustavsson, J.; C. Cederberg; U. Sonesson; R. Van Otterdijk; A. Meybeck. 2011. Global food losses and food waste. Food and agriculture organization of the United Nations. Section 3.2 Study conducted for the International Congress "Save Food!" at Interpack 2011, Düsseldorf, Alemania. FAO, Rural Infrastructure and Agro-Industries Division. 29 p.
- GYGA. 2020. Global yield gap atlas. Yieldgap.org. University of Nebraska, University of Wageningen.
- Haber, F. 1920. The Synthesis of Ammonia from its Elements. Nobel Lecture. (Disponible: www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1918/haber-lecture.pdf). Mayo 2020.
- Hall, A.; V. Sadras. 2009. Chapter 21. Whither crop physiology? En: Sadras, V.; D. Calderini (Eds). *Crop Physiology. Applications for genetic Improvement and agronomy*. Academic Press. Elsevier. Amsterdam.
- Hall, A.; R. Richards. 2013. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. *Field Crops Research* 143: 18-33.
- Hallberg, G. 1987. Agricultural chemicals in ground water: Extent and implications. *American Journal of Alternative Agriculture* 2: 3-15.
- Hamant, O. 2020. Plant scientists can't ignore Jevons paradox anymore. *Nature Plants* 6: 720-722.
- Hare, B.; V. Woods. 2020. *Survival of the friendliest: understanding our origins and rediscovering our common humanity*. Random House. Nueva York. 304 p.
- Hatfield, J.; T. Sauer. 2011. *Soil management: building a stable base for agriculture*. Am. Soc. Agron. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI, EUA.
- He, Y.; S. Trumbore; M. Torn; J. Harden; L. Vaughn; S. Allison; J. Randerson. 2016. Radiocarbon constraints imply reduced carbon uptake by soils during the 21st century. *Science* 353: 1419-1424.
- Herrera, L.; M. Sabatino; F. Jaimes; F.; S. Poggio. 2017. Una propuesta para valorar el estado de conservación de los bordes de caminos rurales en el sudeste bonaerense. *Ecología Austral* 27: 404-414.
- Heisey, P.; K. Fuglie. 2018. *Agricultural research investment and policy reform in high-income countries, ERR-249*, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Hernández, M.; L. Echarte; A. Della Maggiora; M. Cambareri; P. Barbieri; D. Cerrudo. 2015. Maize water use efficiency and evapotranspiration response to N supply under contrasting soil water availability. *Field Crops Res.* 178: 8-15.
- Higham, T.; K. Douka; R. Wood. 2014. The timing and spatiotemporal patterning of Neanderthal disappearance. *Nature* 512, 306-309.
- Hilbert, M.; P. Lopez. 2011. The world technological capacity to store, communicate, and compute information. *Science* 332: 60-65.

- Hirel, B.; J. Le Gouis; B. Ney; A. Gallais. 2007. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. *Journal of Experimental Botany* 58: 2369-2387.
- HLPE. 2014. Food losses and waste in the context of sustainable food systems. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. Roma.
- Hobbs, P. 2007. Conservation agriculture: what is it and why is it important for future sustainable food production? *The Journal of Agricultural Science* 145: 127-137.
- Hsiao, T.; P. Steduto; E. Fereres. 2007. A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrig. Sci.* 25: 209-231.
- Huang, J.; C. Pray; S. Rozelle. 2002. Enhancing the crops to feed the poor. *Nature* 418: 678-684.
- Huerta Wong, J. 2012. El rol de La educación en la movilidad social de México y Chile. *Rev. Mex. de Inv. Educativa* 17: 65-88.
- Hunter, M.; R. Smith; M. Schipanski; L. Atwood; D. Mortensen. 2017. Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification. *BioScience* 67: 386-391.
- IEA. 2012a. International energy agency. Technology Roadmap: Biofuels for Transport. (Disponible: <http://www.iea.org/publications/freepublications>). Julio 2016.
- IEA. 2012b. Energy technologies perspectives 2012. 2DS high renewables. International Energy Perspectives.
- IEA. 2019. World Energy Outlook 2019. IEA, París (Disponible: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>). Febrero 2020.
- IFPRI. 2019. Global spatially-disaggregated crop production statistics data for 2010. Version 2.0. International Food Policy Research Institute (IFPRI). Harvard Dataverse, V4. <https://doi.org/10.7910/DVN/PRFF8V>
- Ikerd, J. 1990. Agriculture's search for sustainability and profitability. *J. Soil Water Cons.* 45: 18-23.
- INTA. 2011. Ejes Conceptuales para un posicionamiento institucional ante el fenómeno de la soja como principal componente del proceso de agriculturización. Documento Interno. 81 p.
- IPBES. 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- IPCC. 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: the physical science basis (summary for policy makers). IPCC. Fourth Assessment Report. (Disponible: <http://www.Ipcc.ch>). Agosto 2017.
- IPCC. 2014. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: Mitigation of climate change. (Disponible: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3>). Julio 2016.
- IPCC. 2019a. Climate change and land. Special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Summary for policymakers. International Panel on Climate Change.
- IPCC. 2019b. Climate change and land. Special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Chapter 4. Land degradation.

- IPCC. 2019c. Climate change and land. Special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Chapter 3. Desertification.
- IPCC. 2019d. Climate change and land. Special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Chapter 5. Food security.
- IPCVA. 2006. Bienestar Animal y Calidad de Carne. Buenas Prácticas de manejo de ganado. Cuadernillo Técnico del IPCVA, N.º 1.
- IPSRM. 2010. International Panel for Sustainable Resource Management. Marrakech Process and Green Economy Initiative: Working towards a Sustainable Consumption and Production for a Green Economy, UNEP.
- Isbell, F.; V. Calcagno; A. Hector; J. Connolly; M. Loreau. 2011. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature* 477: 199-202.
- Isbell, F.; D. Craven; J. Connolly; M. Loreau. 2015. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature* 526: 574-577.
- Izquierdo, N.; L. Aguirrezábal; F. Andrade; V. Pereyra. 2002. Night temperature affects fatty acid composition in sunflower oil depending on the hybrid and the phenological stage. *Field Crops Res.* 77: 115-126.
- Izquierdo, N.; L. Aguirrezábal; F. Andrade; C. Geroudet; M. Pereyra Iraola; O. Valentinuz. 2009. Intercepted solar radiation affects oil fatty acid composition in crop species. *Field Crops Res.* 114: 66-74.
- Jaggard, K.; A. Qi; E. Ober. 2010. Possible changes to arable crop yields by 2050. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 365: 2835-2851.
- Jaime, S.; F. Andrade; F. Bedmar; S. Borracci; C. Leonardi; F. Martens; E. Quagnolo; A. Szczesny; G. Tito; M. Vigna. 2013. Criterios para la gestión de uso de los agroquímicos con un marco de ordenamiento territorial. *Cerbas, Balcarce. INTA.* 50 p.
- Jambeck, J.; R. Geyer; C. Wilcox; T. Siegler; M. Perryman; A. Andrady; K. Law. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347: 768-771.
- JICA-INTA. 2004. Seminario: Sustentabilidad de la producción agrícola. Buenos Aires, Argentina.
- Jobby, E.; O. Sala. 2014. The imprint of crop choice on global nutrient needs. *Environ. Res. Lett.* 9: 084014. 084010 p.
- Jobling, M.; C. Tyler-Smith. 2003. The human Y chromosome: an evolutionary marker comes of age. *Nature Reviews Genetics* 4: 598-612.
- Johnson, K. 1987. Defoliation, disease and growth: a reply. *Phytopathology* 77: 1495-1497.
- Kahneman, D.; A. Deaton. 2010. High income improves evaluation of life but not emotional well-being. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107: 16489-16493.
- Karafet, T.; F. Mendez; M. Meilerman; P. Underhill; S. Zegura; y M. Hammer. 2008. New binary polymorphisms reshape and increase resolution of the human Y chromosomal haplogroup tree. *Genome Research* 18: 830-838.
- Kaul, M.; G. Mohren; V. Dadhwal. 2010. Carbon storage and sequestration potential of selected tree species in India. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 15:489-510.
- Kayal, M.; H. Lewis; J. Ballard; E. Kayal. 2019. Humanity and the 21 st century's resource gauntlet: a commentary on Ripple et al.'s article "World scientists' warning to humanity: a second notice". *Rethinking Ecology* 4: 21-30.

Keating, B.; M. Herrero; P. Carberry; J. Gardner; M. Cole. 2014. Food wedges: framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Global Food Security*, 3: 125-132.

Kenny, A. 2006. Breve historia de la filosofía occidental. Ed Paidós. Buenos Aires. 493 p.

Keynes, J. 1936. The general theory of employment, interest and money. Basingstoke, Hampshire: Palgrave Macmillan.

Kikuchi, M.; K. Lackner; M. Tran. 2012. Fusion physics. IAEA. International Atomic Energy Agency. Viena. 1129 p.

Kleijn, D.; R. Bommarco; T. Fijen; L. Garibaldi; S. Potts; W. Van der Putten. 2019. Ecological Intensification: Bridging the gap between science and practice. *Trends in Ecology & Evolution* 34: 154-166.

Klein, R.; B. Edgar. 2002. The dawn of human culture. John Wiley. Nueva York. 288 p.

Kossin, J.; K. Knapp; T. Olander; C. Velden. 2020. Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades. *PNAS* 117: 11975-11980.

Kryza, F. 2003. The Power of Light: the epic story of man's quest to harness the sun. McGraw-Hill. 326 p.

Kuhn, M.; M. Schularick; U. Steins. 2018. Research: How the financial crisis drastically increased wealth inequality in the U.S. *Harvard Business Review*. (Disponible: <https://hbr.org/2018/09/research-how-the-financial-crisis-dramatically-increased-wealth-inequality-in-the-u-s>). Marzo 2020.

Kummu, M.; H. De Moel; M. Porkka; S. Siebert; O. Varis; P. Ward. 2012. Lost food, wasted resources: Global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use. *Science of the Total Environment* 438: 477-489.

Lal, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International* 29: 437-450.

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.

Lal, R. 2019. Conceptual basis of managing soil carbon: Inspired by nature and driven by science. *Journal of Soil and Water Conservation* 74: 29-34.

Lancet Commissions. 2019. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Elsevier Ltd. 47 p. (Disponible: www.thelancet.com). Marzo 2020.

Larsen, M.; P. Hamilton; W. Werkheiser. 2013. Water quality status and trends in the United States. En: Ahuja, S. (Ed.). *Monitoring water quality*. Elsevier, NC EUA. 19-57 pp.

Larson, G.; D. Piperno; R. Allaby; M. Purugganan; L. Andersson; M. Arroyo-Kalin; L. Barton; C. Climer Vigueira; T. Denham; K. Dobney; A. Doust; P. Gepts; M. Gilbert; K. Gremillion; L. Lucas; L. Lukens; F. Marshall; K. Olsen; J. Pires; P. Richerson; R. Rubio de Casas; O. Sanjur; M. Thomas; D. Fuller. 2014. Current perspectives and the future of domestication studies. *PNAS*. 111: 6139-6146.

Lassaletta, L.; G. Billen; B. Grizzetti; J. Anglade; J. Garnier. 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9: 1-9.

Laterra, P.; E. Jobbagy; J. Paruelo. 2011. Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.

- Laulhe, I. 2015. Modelación de la sustentabilidad productiva y económica de sistemas agrícolas, mixtos y ganaderos en el sur de buenos aires. Tesis Magíster Scientiae en Producción Animal. Facultad de Ciencias Agrarias Univ. Nac. de Mar del Plata. 122 p.
- Lawson, M.; M. Chan; F. Rhodes; A. Butt; A. Marriott; E. Ehmke; D. Jacobs; J. Seghers; J. Atienza; R. Gowland. 2019. Public good or private wealth? Oxfam. (Disponible: www.oxfamamerica.org/static/media/files/bp-public-good-or-private-wealth-210119). Marzo 2020.
- LCAM. 2009. Land Commodities Asset Management AG. The land commodities global agriculture and farmland investments report. A mid term outlook. Suiza. (Disponible: www.landcommodities.com). Julio 2106.
- Le, Q.B.; E. Nkonya; A. Mirzabaev. 2016. Biomass productivity-based mapping of global land degradation hotspots. P. 55–84 Em: Nkonya, E.; A. Mirzabaev; J. Von Braun (Eds.). Economics of Land Degradation and Improvement. A Global Assessment for Sustainable Development. Springer International Publishing, Cham. 55-84 pp.
- Lechenet, M.; F. Dessaint; G. Py; D. Makowski; N. Munier-Jolain. 2017. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants* 3, 17008. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.8>
- Lema, D. 2017. Capítulo 2. Evolución y perspectiva de la producción y de la productividad agropecuaria. En: Andrade, F. (Ed.). Los desafíos de la agricultura argentina. Satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental. Ediciones INTA. 120 p.
- Lemaire, G.; A. Franzluebbers; P. De Faccio Carvalho; B. Dedieu. 2014. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 190: 4-8.
- Leonardi, C.; E. Adlercreutz; F. Andrade; V. Aparicio; F. Bedmar; E. Camadro; D. Carmona; J. Elverdin; S. Guido; D. Huarte; H. Krüger; N. Maceira; J. Manchado; M. Manzoni; G. Studdert; A. Szczesny; G. Tito; L. Viglianchino; C. Villagra. 2015. Coloquio sobre sustentabilidad. Hacia una agricultura sustentable situada en el territorio. INTA. (Disponible: <http://inta.gob.ar/documentos/coloquio-sobre-sustentabilidad>). Julio 2016.
- Leong, W.; J. Lim; M. Lam; Y. Uemura; Y. Ho. 2018. Third generation biofuels: A nutritional perspective in enhancing microbial lipid production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91: 950-961.
- Levine, E.; J. Spencer; S. Isard; D. Onstad; M. Gray. 2002. Adaptation of the Western Corn Rootworm to Crop Rotation: Evolution of a New Strain in Response to a Management Practice. *American Entomologist* 48: 94-107.
- Liebig Von, J. 1841. *Chemie Organique appliquée à la Physiologie Végétale et à l'Agriculture*.
- Lobell, D.; W. Schlenker; J. Costa-Roberts. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333: 616-620.
- Lobell, D.; G. Hammer; G. McLean; C. Messina; M. Roberts; W. Schlenker. 2013. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change* 3:497-501.
- Loomis, R.; D. Connor. 1992. *Crop Ecology. Productivity and management in agricultural systems*. Cambridge University Press. Nueva York EUA. 538 p.
- Ludlow, M.; R. Muchow. 1990. A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Adv. Agron.* 43: 107-153.
- Lund, H. 2007. Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy* 32: 912-919.

- Lundqvist, J.; C. De Fraiture; D. Molden. 2008. Saving Water: from Field to Fork: Curbing Losses and Wastage in the Food Chain 20-23. Stockholm International Water Institute.
- Luyten, J. 1995. Sustainable world food production and environment. AB.D-LO. Dutch Agricultural Research Department, Wageningen. Países Bajos.
- Maceira, N.; J. Elverdín; S. Guido. 2015. Ordenamiento Territorial, Servicios Ecosistémicos y Observatorios Ambientales. En: Leonardi, C. (Ed.). Hacia una agricultura sustentable situada en el territorio. INTA. (Disponible: <http://inta.gob.ar/documentos/coloquio-sobre-sustentabilidad>). Mayo 2017.
- Maddison, A. 2001. The world economy: A millennial perspective. OCDE, París.
- Maddonni, G. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina. A probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.* 107, 325-345.
- Magrin, G. 2007. Pronóstico de cambio climático en la región Pampeana y extrapampeana. Seminario Taller: Estrategias de mejoramiento frente a nuevas demandas del sistema productivo en cereales y oleaginosas. INTA. Buenos Aires.
- Malthus, T. 1798. An Essay on the Principle of Population. 1st edition Johnson, Londres.
- Mann, C. 2013. 1493. Una nueva historia del mundo después de Colón. Katz Editores. Madrid. 631 p.
- Manske, G.; J. Ortiz-Monasterio; M. Van Ginkel; R. Gonzalez; S. Rajaram; E. Molina; P. Vlek. 2000. Traits associated with improved P-uptake efficiency in CIMMYT's semidwarf spring wheat grown on an acidic Andisol in Mexico. *Plant Soil* 221: 189-204.
- Mao, Y.; J. Botella; Y. Liu; J. Zhu. 2019. Gene editing in plants: progress and challenges. *National Science Review* 6: 421-437.
- Margueron, J. 2002. Los metales utilizados y su origen geográfico. Los mesopotámicos. Ediciones Cátedra S.A. Madrid. 480 p.
- Martre, P.; N. Bertin; C. Salon; M. Génard. 2011. Modelling the size and composition of fruit, grain and seed by process-based simulation models. *New Phytologist* 191:601-618.
- McDonald, G.; G. Gill. 2009. Chapter 18. Improving crop competitiveness with weeds: adaptations and trade offs. En: Sadras, V.; D. Claderini (eds.). *Crop Physiology. Applications for genetic improvement and agronomy*. Academic Press. Elsevier. Amsterdam. 581 p.
- Meadows, D.; J. Randers; D. Meadows. 2012. Los límites del crecimiento. Tauros. Buenos Aires. 424 p.
- Medigo. 2020. Life saving innovations. (Disponible: <https://www.medigo.com/blog/infographics/lifesaving-innovations/>). Noviembre 2020.
- Mekonnen, M.; A. Hoekstra. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances* 2:e1500323
- Melaj, M.; H. Echeverría; S. López; G. Studdert; F. Andrade; N. Bárbaro. 2003. Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. *Agron. Journal* 95: 1525-1531.
- Mendel, G. 1865. Experiments in plant hybridization. Read at the February 8th, and March 8th, 1865, meetings of the Brünn Natural History Society.
- Mercau, J.; M. Otegui. 2015. A Modeling Approach to Explore Water Management Strategies for Late-Sown Maize and Double-Cropped Wheat-Maize in

- the Rainfed Pampas Region of Argentina. En: Ahuja, L.R.; L. Ma; R.J. Lascano (Eds.). *Advances in Agricultural Systems Modeling*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. 351-373 pp.
- Meyer, M.; J. Arsuaga; C. De Filippo; S. Nagel; A. Aximu-Petri; B. Nickel; S. Paabo. 2016. Nuclear DNA sequences from the Middle Pleistocene Sima de los Huesos hominins. *Nature* 531: 504-507.
- Michl, J. 2019. Singlet Fission. Toward more efficient solar cells. *Substantia* 3 Suppl 2: 45-54.
- Micronutrient Initiative. 2015. Micronutrient Initiative. (Disponible: www.micronutrient.org). Julio 2016.
- Milanovic, B. 2018. Desigualdad mundial. Un nuevo enfoque para la era de la globalización. Editorial: Fondo de Cultura Económica. México D.F. México. 305 p.
- Minasny, B.; B. Malone; A. McBratney; D. Angers; D. Arrouays; A. Chambers; V. Chaplot; L. Winowicki. 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292: 59-86.
- Molden, D. 2007. Water for food, Water for life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. Earthscan/IWMI.
- Monckeberg, F. 1993. Jaque al subdesarrollo ahora. Ediciones pedagógicas chilenas. Ediciones Dolmen. Chile. 180 p.
- Monfreda, C.; N. Ramankutty; J. Foley. 2008. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000, *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB1022. doi:10.1029/2007GB002947
- Monzon, J.P.; J. Mercau, J. Andrade; A. Cerrudo; O. Caviglia; A. Cirilo; C. Vega; F. Andrade; P. Calviño. 2014. Maize-soybean intensification alternatives for the Pampas of Argentina. *Field Crops Res.* 162: 48-59.
- Monzon, J.; P. Calviño; V. Sadras; J. Zubiaurre; F. Andrade. 2018. Precision agriculture based on crop physiological principles improves whole-farm yield and profit: A case study. *European Journal of Agronomy* 99: 62-71.
- Monzon, J.; N. Cafaro La Menza; A. Cerrudo; M. Canepa; J. Rattalino Edreira; J. Specht; P. Grassini; F. Andrade. 2020. Critical period for seed number determination in soybean as determined by crop growth rate, duration, and dry matter accumulation. En revisión.
- Morin, E. 2011. La voie. Pour l'avenir de l'humanité. Fayard, Francia.
- Moscardi, E. 2003. Hacia una interpretación evolucionista de las grandes revoluciones. Corporación Latinoamericana Misión Rural. CLMR. 208 p.
- Mosier, A.; C. Kroeze; C. Nevison; O. Oenema; S. Seitzinger; O. Van Cleemput. 1998. Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52: 225-248.
- Mouchot, A. 1869. La Chaleur solaire et ses applications industrielles. Gauthier-Villars, Paris. 238 p.
- Mueller, N.; J. Gerber; M. Johnston; D. Ray; N. Ramankutty; J. Foley. 2012. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature* 490: 254-257.
- Muller, A.; C. Schader; N. El-Hage Scialabba; J. Brüggemann; A. Isensee; K. Erb; P. Smith; P. Klocke; F. Leiber; M. Stolze; U. Niggli. 2017. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nat Commun* 8: 1290. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01410-w>
- Murgida, A.; M. Travasso; S. Gonzalez; G. Rodriguez. 2014. Evaluación de impactos del cambio climático sobre la producción agrícola en la Argentina. CEPAL. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N.º 155.

Nagore, M.; L. Echarte; A. Della Maggiora; F. Andrade. 2010. Rendimiento, consumo y eficiencia de uso del agua del cultivo de maíz bajo estrés hídrico. IX Congreso Nacional de Maíz, Simposio Nacional de Sorgo. Rosario, Santa Fe, Argentina.

Nagore, M.; L. Echarte; F. Andrade; A. Della Maggiora. 2014. Crop evapotranspiration in Argentinean maize hybrids released in different decades. *Field Crops Res.* 155: 23-29.

Nagore, M.; A. Della Maggiora; F. Andrade; L. Echarte. 2017. Water use efficiency for grain yield in an old and two more recent maize hybrids. *Field Crops Res.* 214: 185-193.

Naik, S.; V. Goud; P. Rout; A. Dalai. 2010. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 578-597.

Nature. 2010. How to feed a hungry World. *Nature Editorials* 466:531-532.

Nature. 2020. Ending hunger: science must stop neglecting smallholder farmers. *Nature* 586: 336.

Neiff, N.; S. Trachsel; O. Valentinuz; C. Balbi; F. Andrade. 2016. High temperatures around flowering in maize: effects on photosynthesis and grain yield in three genotypes. *Crop Sci.* 56:1-11.

Nepstad, D.; D. McGrath; C. Stickler; A. Alencar; A. Azevedo; B. Swette; T. Bezerra; M. DiGiano; J. Shimada; R. Seroa da Motta; E. Armijo; L. Castello; P. Brando; M. Hansen; M. McGrath-Horn; O. Carvalho; L. Hess. 2014. Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science* 344: 1118-1123.

Nerem, B.; D. Beckley; J. Fasullo; B. Hamlington; D. Masters; G. Mitchum. 2018. Climate change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115: 2022-2025. EUA.

Nicholls, C.; M. Altieri. 2011. Modelos ecológicos y resilientes de producción agrícola para el siglo XXI. *Agroecología* 6: 28-37.

Nietzsche, F. 1901. *La voluntad de dominio*. Editorial Aguilar, Buenos Aires, 1962. 728 p.

NOAA. 2019. National Oceanic Research Administration. Earth System Research Laboratory. Mauna Loa Observatory. Global Monitoring Division. (Disponible: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>). Marzo 2020.

Nogués, G. 2018. *Pensar con otros*. El Gato y la Caja. Buenos Aires, Argentina.

Norse, D.; C. James; B. Skinner; Q. Zhao. 1992. Agriculture, land use and degradation. En: Doodge, J. (Ed.). Brennan, M. (comp.). *An agenda of Science for environment and development into the 21st Century*. Based on a Conference held in Vienna, Austria. Cambridge University Press, Londres, Reino Unido

Nova-Institute. 2020. The global bio-based polymer market 2019. A revised view on a turbulent and growing Market. European Bioplastics. Nova-Institute GmbH.

Oerke, E. 2006. Crop losses to pests. *Journal of Agricultural Science* 144: 31-43.

Ohlrogge, J.; V. Mhaske; F. Beisson; S. Ruuska. 2004. Genomics Approaches to lipid Biosynthesis. En: Fischer, R. (Ed.). *New Directions for a Diverse Planet: Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia*. (Disponible: <http://www.cropscience.org.au/icsc2004/>). Julio 2016.

Oldeman, L. 1992. Global Extent of Soil Degradation. *ISRIC Bi-Annual Report 1991-1992*, ISRIC. Wageningen. Países Bajos. 19-36 pp.

- Olivier, J.; G. Janssens-Maenhout; J. Peters. 2012. Trends in global CO₂ emissions. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency Report, The Hague.
- Oppenheimer, A. 2014. Crear o morir. La esperanza de Latinoamérica y las cinco claves de la innovación. *Vintage Español*. 315 p.
- Oreskes, N. 2005. The Scientific Consensus on Climate Change. *Science* 306: 1686.
- Otegui, M.; L. Borrás; G. Maddonni. 2015. Capítulo 15. Crop phenotyping for physiological breeding in grain crops: a case study for maize. En: Sadras, V.; D. Calderini (Eds.). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. 2nd Edition. Elsevier, Academic Press.
- Otegui, M.; S. Uhart; A. Cirilo; F. Andrade. 2020. Maize. En: Sadras, V.; D. Calderini (Eds.). *Crop Physiology*.
- Outram, A.; N. Stear; R. Bendrey; S. Olsen; A. Kasparov; V. Zaibert; N. Thorpe; R. Evershed. 2009. The earliest horse harnessing and milking. *Science* 323: 1332-1335.
- Padella, M.; A. O'Connell; M. Prussi. 2019. What is still Limiting the Deployment of Cellulosic Ethanol? Analysis of the Current Status of the Sector. *Appl. Sci.* 9: 4523.
- Panfil, S.; C. Harvey. 2015. REDD+ and Biodiversity Conservation: A review of the biodiversity goals, monitoring methods and impacts of 80 REDD+ projects. *Conserv. Lett.* 9: 143-150.
- Panwar, N.; S. Kaushik; S. Kothari. 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 1513-1524.
- Pardey, P.; P. Pingali. 2010. Reassessing international agricultural research for food and agriculture. *Global Conference on Agricultural Research for Development (GCARD)*.
- Pardey, P.; J. Alston; C. Chan-Kang. 2013. Public food and agricultural research in the United States: The rise and decline of public investments, and policies for renewal. *AGree Policy Report*, Washington D. C.
- Parfitt, J.; M. Barthel; S. Macnaughton. 2010. Food waste within food supply chains: quantification and potential for change to 2050. *Phil. Trans. R. Soc. B* 365: 3065-3081.
- Passioura, J. 2012. Phenotyping for drought tolerance in grain crops: when is it useful to breeders? *Functional Plant Biology* 39: 851-859.
- Pastore, M. 2018. Re-interpreting the relationship between water and urban planning: the case of Dar es Salaam. *Routledge*. Taylor and Francis group. Londres-Nueva York. 182 p.
- Pellegrini, P.; R. Fernández. 2018. Crop intensification, land use, and on-farm energy-use efficiency during the worldwide spread of the green revolution. *PNAS* 115: 2335-2340.
- Peyraud, J.; M. Taboada; L. Delaby. 2014. Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: A review. *European J. of Agronomy* 57: 31-42.
- Phalan, B.; M. Onial; A. Balmford; R. Green. 2011. Reconciling Food Production and Biodiversity Conservation: Land Sharing and Land Sparing Compared. *Science* 333: 1289-1291.
- Phillips, R. 2010. Mobilizing science to break yield barriers. *Crop Sci.* 50: S99-S108.

- Pietrobon, M. 2012. Densidad de plantas en el cultivo de maíz y su efecto sobre la eficiencia de uso de nitrógeno. Tesis MSc. Facultad de Ciencias Agrarias UNMP.
- Piketty, T. 2015. La crisis del capital en el siglo XXI. Siglo XXI Ediciones.
- Piñeiro, G.; P. Pinto; S. Arana; J. Sawchik; J. Diaz; F. Gutierrez; R. Zarza. 2014. Cultivos de servicio. Integrando la ecología con la producción agrícola. Actas XXVI Reunión argentina de Ecología. Comodoro Rivadavia, Argentina.
- Pittelkow, C.; B. Linquist; M. Lundy; X. Liang; K. Van Groenigen; J. Lee; N. Van Gestel; J. Six; R. Venterea; C. Van Kessel. 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Res.* 183:156-168.
- Poniso, L.; L. M'Gonigle; K. Mace; J. Palomino; P. De Valpine; C. Kremen. 2015. Diversification practices reduce organic to conventional yield gap. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 282, 20141396.
- Pontaroli, A. 2013. How can we foster crop improvement? *Journal of Basic and Applied Genetics* 23: 4-6.
- Poore, J.; T. Nemecek. 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360: 987-992.
- Pordomingo, A. 2003. Gestión ambiental en el feedlot. Guía de buenas prácticas. Programa Nacional de Gestión Ambiental del INTA. INTA Anguil, La Pampa, Argentina. 99 p.
- Portmann, F.; S. Siebert; P. Döll. 2010. MIRCA2000- Global monthly irrigated and rainfed croplands around the year 2000: A new high resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global Biogeochemical Cycles* 24. GB1011, doi: 10.1029/2008GB003435, 2010
- Posse, G. 2017. Capítulo 3.5. Emisiones de gases de efecto invernadero. En: Andrade, F. (Ed.). Los desafíos de la agricultura argentina. Satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental. Ediciones INTA. 120 p.
- Postel, S. 1998. Water for Food Production: Will There Be Enough in 2025? *BioScience* 48: 629-637.
- Postgate, J. 1998. Nitrogen Fixation, 3rd Edition. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Potts, R. 1998. Variability selection in hominid evolution. *Evolutionary Anthropology* 7: 81-6.
- Powell, B. 2009. Writing: Theory and History of the Technology of Civilization. Blackwell Pub. Oxford. 276 p.
- Powers, S.; R. Chowdhury; G. MacDonald; G. Metson; A. Beusen; A. Bouwman; S. Hampton; B. Mayer; M. McCrackin; D. Vaccari. 2019. Global opportunities to increase agricultural independence through phosphorus recycling. *Earth's future* 7: 370-383.
- Pretty, J. 2018. Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *Science* 362: eaav0294.
- Pretty, J.; T. Benton; Z. Pervez Bharucha; L. Dicks; C. Flora; H. Godfray; D. Goulson; S. Hartley; N. Lampkin; C. Morris; G. Pierzynski; P. Vara Prasad; J. Reganold; J. Rockström; P. Smith; P. Thorne; S. Wratten. 2018. Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability* 1: 441-446.
- Prieto. 2017. Capítulo 3.3. Uso del agua. En: Andrade F. (Ed). Los desafíos de la agricultura argentina. Satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental. Ediciones INTA.
- Raimondi, P.; C. Creus; S. Feingold; E. Camadro. 2002. Las plantas transgénicas. ¿Constituyen un riesgo para el ambiente? *Nexos* 15: 15-20.

- Raja, R.; D. Slaughter; S. Fennimore; T. Nguyen; V. Vuong; N. Sinha; L. Tourte; R. Smith; M. Siemens. 2019. Crop signalling: A novel crop recognition technique for robotic weed control. *Biosystems Engineering* 187: 278-291.
- Ramankutty, N.; J. Foley; J. Norman; K. McSweeney. 2002. The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. *Global Ecology and Biogeography* 11: 377-392.
- Ramankutty, N.; T. Hertel; H. Lee. 2004. Global land use and land cover data for Integrated Assessment Modeling. (Disponible: <http://www.researchgate.net/publication/200033422>). Junio 2016.
- Ramankutty, N.; A. Evan; C. Monfreda; J. Foley. 2008. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochem. Cycles* 22, GB1003.
- Raskin, P.; T. Banuri; G. Gallopin; P. Gutman; A. Hammond; R. Kates; R. Swart. 2002. Great Transition. The Promise and Lure of the Times Ahead. A report of the Global Scenario Group. Stockholm Environment Institute, Boston. 100 p.
- Rasmuson, M.; R. Zetterström. 1992. World population, environment and energy demands. *Ambio* 21: 70-74.
- Rattalino Edreira, J.; M. Otegui. 2012. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. *Field Crops Res.* 130: 87-98.
- Ray, D.; N. Mueller; P. West; J. Foley. 2013. Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production by 2050. *PlosOne* 8(6): e66428.
- Reeves, T.; G. Thomas; G. Ramsay. 2016. Save and grow in practice: maize, rice, wheat. A guide to sustainable cereal production. FAO, Roma. 111 p.
- Reid, W.; H. Mooney; A. Cropper. 2005. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Informe síntesis. (Disponible: <http://millenniumassessment.org/documents/document.439.aspx.pdf>). Junio 2016.
- REN 21. 2019. Global Status Report. (Disponible: <https://www.ren21.net/gsr-2019/>). Marzo 2020.
- Ripple, W.; C. Wolf; T. Newsome; M. Galetti; M. Alamgir; E. Crist; M. Mahmoud; W. Laurance and 15364 scientist signatories from 184 countries. 2017. World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice. *BioScience* 67: 1028-1028.
- Ritchie, H. 2020. You want to reduce the carbon footprint of your food? Focus on what you eat, not whether your food is local. Our World in Data. (Disponible: <https://ourworldindata.org/food-choice-vs-eating-local>). Noviembre 2020.
- Ritchie, H.; M. Roser. 2020. Water Use and Stress. Published online at Our World In Data. (Disponible: <https://ourworldindata.org/water-use-stress>). Noviembre 2020.
- Robles, M.; A. Cerrudo; J. Di Matteo; P. Barbieri; R. Rizzalli; F. Andrade. 2011. Nitrogen use efficiency of maize hybrids released in different decades. ASA Congress. San Antonio, Texas, EUA.
- Rockström, J.; W. Steffen; K. Noone; Å. Persson; F. Stuart Chapin; E. Lambin; T. Lenton; M. Scheffer; C. Folke; H. Schellnhuber; B. Nykvist; C. De Wit; T. Hughes; S. Van der Leeuw; H. Rodhe; S. Sörlin; P. Snyder; R. Costanza; U. Svedin; M. Falkenmark; L. Karlberg; R. Corell; V. Fabry; J. Hansen; B. Walker; D. Liverman; K. Richardson; P. Crutzen; J. Foley. 2009a. A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472-475.
- Rockström, J.; M. Falkenmark; L. Karlberg; H. Hoff; S. Rost; D. Gerten. 2009b. Future water availability for global food production: The potential of green

- water for increasing resilience to global change. *Water resources research* 45. doi: 10.1029/2007WR006767
- Rockström, J.; O. Edenhofer; J. Gaertner; F. DeClerck. 2020. Planet-proofing the global food system. *Nature Food* 1: 3-5.
- Rosegrant, M.; J. Huang; A. Sinha; H. Ahammad; C. Ringler; T. Zhu; T.B. Sulser; S. Msangi; M. Batka. 2008. Exploring Alternative Futures for Agricultural Knowledge, Science and Technology (AKST). ACIAR Project. Report ADP/2004/045. IFPRI. Washington D. C.
- Rosegrant, M.; J. Koo; N. Cenacchi; C. Ringler; R. Robertson; M. Fisher; C. Cox; K. Garrett; N. Perez; P. Sabbagh. 2014. Food security in a world of natural resource scarcity. The role of agricultural technologies. International Food Policy Research Institute. Washington D. C.
- Roser, M.; B. Ortiz Ospina. 2018. Literacy. Our World In Data. (Disponible: <https://ourworldindata.org/literacy>). Marzo 2020.
- Roser, M.; H. Ritchie. 2013. Hunger and Undernourishment. Our World in data. (Disponible: <https://ourworldindata.org/hunger-and-undernourishment#mode-rate-food-insecurity>). Julio 2016.
- Rosyara, U.; M. Kishii; T. Payne; C. Sansaloni; R. Prakash Singh; H. Braun; S. Dreisigacker. 2019. Genetic Contribution of Synthetic Hexaploid Wheat to CIMMYT's Spring Bread Wheat Breeding Germplasm. *Scientific Reports* 9: 12355.
- Rost, S.; D. Gerten; H. Hoff; W. Lucht; M. Falkenmark; J. Rockström. 2009. Global potential to increase cropproduction through water management inrainfed agriculture. *Environ. Res. Lett.* 4 044002. 9 p. doi:10.1088/1748-9326/4/4/044002
- Rousseau, J. 1762. *Émile ou de l'éducation*. Chez Jean Néaulme Libraire. Ámsterdam.
- Roxburgh, C.; D. Rodriguez. 2016. Ex-ante analysis of opportunities for the sustainable intensification of maize production in Mozambique. *Agricultural Systems* 142: 9-22.
- Rubin, E. 2008. Genomics of cellulosic biofuels. *Nature* 454: 841-845.
- Russell, B. 1912. *The problems of philosophy*. Home University library.
- Russell, B. 1932. *Education and the social order*. George Allen and Unwin Ltd. Londres. 254 p.
- Russell, W. 1986. Contribution of breeding to maize improvement in the United States, 1920s-1980s. *Iowa State Journal of Research* 61: 5-34.
- Sadras, V. 2002. Capítulo 12. Plagas y cultivos. Una perspectiva fitocéntrica. En: Andrade, F.; V. Sadras (Eds.). *Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja*. Unidad Integrada INTA Balcarce FCA UNMP. 450 p.
- Sadras, V. 2020. Agricultural technology is unavoidable, directional, combinatory, disruptive, unpredictable and has unintended consequences. Outlook on agriculture. En prensa.
- Sadras, V.; D. Calderini; D. Connor. 2009. Capítulo 1. Sustainable agriculture and crop physiology. En: Sadras, V.; D. Calderini (Eds.). *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. Macmillian Publishing Solutions.
- Sadras, V.; R. Denison. 2016. Neither crop genetics nor crop management can be optimised. *Field Crops Res.* 189:75-83.
- Sadras, V.; P. Hayman; D. Rodriguez; M. Monjardino; M. Bielich; M. Unkovich; B. Mudge; E. Wang. 2016. Interactions between water and nitrogen in Australian cropping systems: physiological, agronomic, economic, breeding and modelling perspectives. *Crop and Pasture Science* 67: 1019-1053.

- Sadras, V.; J. Alston; P. Aphalo; D. Connor; R. Ford Denison; T. Fischer; R. Gray; P. Hayman; J. Passioura; J. Porter; T. Reeves; D. Rodriguez; M. Ryan; F. Villalobos; D. Wood. 2020. Making science more effective for agriculture. *Advances in Agronomy*. Disponible: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.05.003>. Noviembre 2020.
- Sahrawat, K.; A. Kassam. 2013. Conservation agriculture: Global prospects and challenges. CABI, Wallingford Oxfordshire OX10 8DE, Reino Unido.
- Saini, R. 2014. Pest and pesticide management. Challenges and future prospects. En: Saini, K.; G. Yadav; B. Kumari (Eds.). *Novel approaches in pest and pesticide management in agroecosystem*. CCS Haryana Agricultural University. Hisar. India. 1-11 pp.
- Sainz Rozas, H.; H. Echeverría; F. Andrade; G.A. Studdert. 1997. Efecto del inhibidor de la ureasa y momento de fertilización sobre la absorción de nitrógeno y rendimiento del cultivo de maíz bajo siembra directa. *Rev. Fac. Agron. La Plata*. 102: 129-136.
- Sainz Rozas, H.; H. Echeverría; H. Angelini. 2011. Niveles de materia orgánica y de pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo* 29: 29-37.
- Sakaiya, T. 1994. *Historia del futuro. La sociedad del conocimiento*. Editorial Andrés Bello. Santiago de Chile. 355 p.
- Sáleka, M.; V. Hula; M. Kipson; R. Daňková; J. Niedobová; A. Gamero. 2018. Bringing diversity back to agriculture: Smaller fields and non-crop elements enhance biodiversity in intensively managed arable farmlands. *Ecological Indicators* 90: 65-73.
- Salvagiotti, F.; H. Krüger; G. Studdert. 2017. *Ensayos de larga duración en Argentina: Un aporte al logro de sistemas agrícolas sustentables*. Ediciones INTA, Buenos Aires. Argentina.
- Samberg, L.; J. Gerber; N. Ramankutty; M. Herrero; P. West. 2016. Subnational distribution of average farm size and smallholder contributions to global food production. *Environ Res Lett* 11:124010.
- Sarlangué, T.; F. Andrade; P. Calviño; L. Purcell. 2007. Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agron. J.* 99: 984-991.
- Satorre, E. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura actual. *Ciencia Hoy*, 15: 24-31.
- Satorre, E. 2015. Los sistemas de producción agrícola y el problema de malezas. Oportunidades y limitaciones para su manejo integrado. *Actas XXII Congreso Latinoamericano de Malezas*. ALAM, ASACIM. Buenos Aires, Argentina. 20-22 pp.
- Satorre, E. 2020. *Sistemas productivos sostenibles*. CREA. 333 p.
- Satorre, E.; F. Andrade. 2020. Cambios productivos y tecnológicos de la agricultura extensiva argentina en los últimos quince años. *Ciencia Hoy*. En Prensa
- Satorre, E.; B. Kruk; E. De la Fuente. 2016. *Bases y herramientas para el manejo de malezas*. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. Buenos Aires. 285 p.
- Savary, S.; L. Willocquet. 2020. Modeling the impact of crop diseases on global food security. *Annu. Rev. Phytopathol.* 58: 13.1-13.29.
- Sbarbati Nudelman, N. 2011. Uso Sustentable de Agroquímicos. *Debates a nivel nacional e internacional*. *Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria*. Tomo LXV: 471-482.
- Scherr, S. 1999. *Soil Degradation: A Threat to Developing-Country Food Security by 2020?* Food, Agriculture and the Environment Discussion Paper: 63. International Food Policy Research Institute. Washington, D. C.

- Schlesinger, W.; R. Amundson. 2019. Managing for soil carbon sequestration: Let's get realistic. *Glob Change Biol.* 25: 386-389.
- Schopenhauer, A. 1851. *Parerga y paralipómena*. Berlín, A.W. Hayn. *Parerga y paralipómena*. Madrid, Trotta, 2006. 510 p.
- Schroeder, J.; E. Delhaize; W. Frommer; M. Guerinot; M. Harrison; L. Herrera-Estrella; T. Horie; L. Kochian; R. Munns; N. Nishizawa; Y. Tsay; D. Sanders. 2013. Using membrane transporters to improve crops for sustainable food production. *Nature* 497: 60-66.
- Schultz, T. 1960. Capital Formation by Education. *Journal of Political Economy* 686: 571-583.
- Schwarzenbach, R.; T. Egli; T. Hofstetter; U. Von Gunten; B. Wehrli. 2010. Global Water Pollution and Human Health. *Annual Review of Environment and Resources* 35: 109-136.
- Science. 2011. Special Section. Population. 9 billion? *Science* 333: 540-543.
- Searchinger, T.; S. Wiersenius; T. Beringer; P. Dumas. 2018. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature* 564: 249-253.
- Sekhom, B. 2014. Nanotechnology in agri-food production: an overview. *Nanotechnol. Sci. Appl.* 7: 31-53.
- Sen, A. 1981. *Poverty and Famines: An Essay on Entitlement and Deprivation*. Clarendon Press. Oxford. 257 p.
- Seufert, V.; N. Ramankutty; J. Foley. 2012. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature* 485, 229-232.
- Sharma, H.; K. Sharma; J. Crouch. 2004. Genetic transformation of crops for insect resistance: Potential and limitations. *Crit. Rev. Plant Sci.* 23: 47-72.
- Sharma, B.; A. Sarkar; P. Singh; R. Singh. 2017. Agricultural utilization of biosolids: a review on potential effects on soil and plant grown. *Waste Manag.* 64: 117-132.
- Sharples, A.; H. Jarvie; A. Buda; L. May; B. Spears; P. Kleinman. 2013. Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. *Journal of Environmental Quality* 42: 1308-1326.
- Shennan, C. 2008. Biotic interactions, ecological knowledge and agriculture. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363: 717-739.
- Shiklomanov, I. 2000. Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water International* 25: 11-32.
- Shreeve, J. 2006a. The greatest Journey. *National Geographic* 209: 60-69.
- Shreeve, J. 2006b. Reading the secrets of the blood. *National Geographic* 209: 70-73.
- Simmons, A. 2007. *The neolithic revolution in the Near East*. Univ. of Arizona Press. Tucson, EUA. 340 p.
- Sims, J.; R. Simard; B. Joern. 1998. Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *Journal of Environmental Quality* 27: 277-293.
- Sinclair, T.; L. Purcell. 2005. Is a physiological perspective relevant in a 'geocentric' age? *J. Exp. Bot.* 56, 2777-2782.
- Smil, V. 2017. *Energy and Civilization. A History*. The MIT Press Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts. 552 p.
- Smith, A. 1776. *An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations*. En: Campbell, R.; A. Skinner; W. Todd (eds.). Reprint by Oxford University Press 1976. 543 p.

- Smith, P. 2013. Delivering Food Security without Increasing Pressure on Land. *Global Food Security* 2: 18-23.
- Sparling, D.; G. Fellers; L. McConnell. 2001. Pesticides and amphibian population declines in California, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry* 20: 1591-1595.
- Speelman, E.; S. López-Ridaura; N. Colomer; M. Astier; O. Masera. 2007. Ten years of sustainability evaluation using the MESMIS framework: Lessons learned from its application in 28 Latin American case studies. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 14: 345-361.
- Spencer, H. 1864. *The principles of biology*. New York: Appleton, 1891.
- Springmann, M.; M. Clark; D. Mason-D'Croz; K. Wiebe; B. Bodirsky; L. Las-saletta; W. de Vries; S. Vermeulen; M. Herrero; K. Carlson; M. Jonell; M. Troe-ll; F. DeClerck; L. Gordon; R. Zurayk; P. Scarborough; M. Rayner; B. Loken; J. Fanzo; H. Godfray; D. Tilman; J. Rockström; W. Willett. 2018. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562: 519-525.
- Stafford, J. 2005. *Precision agriculture*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, Países Bajos. 1005 p.
- Stanford, C.; H. Bunn. 2001. *Meat-eating and human evolution*. Oxford University Press Inc. 369 p.
- Steffen, W.; M. Stafford Smith. 2013. Planetary boundaries, equity and global sustainability: why wealthy countries could benefit from more equity. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5:1-6.
- Steffen, W.; P. Crutzen; J. McNeill. 2007. The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature? *Ambio* 36:314-321.
- Stelzer, S.; S. Neubauer; J. Hublin; F. Spoor; P. Gunz. 2019. Morphological trends in arcade shape and size in Middle Pleistocene Homo. *Am. J. Phys. Anthropol.* 168:70-91.
- Stewart, W.; D. Dobb; A. Johnston; T. Smyth. 2005. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agron. J.* 97: 1-6.
- Steinbach, H.; R. Alvarez. 2006. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in Pampean agroecosystem. *Journal of Environmental Quality* 35: 3-13.
- Stiglitz, J. 2002. *El malestar en la globalización*. Taurus. 314 p.
- Striedter, G. 2004. *Principles of brain evolution*. Sinauer Associates. Inc. 436 p.
- Stringer, C. 2012. The status of *Homo heidelbergensis* (Schoetensack 1908). *Evolutionary Anthropology* 21: 101-107.
- Stringer, C.; P. Andrews. 2005. *The Complete World of Human Evolution*. Thames & Hudson. Nueva York.
- Stuart, A.; K. Devkota; T. Sato; A. Pame; S. Beebout; G. Singleton. 2018. On-farm assessment of different rice crop management practices in the Mekong Delta, Vietnam, using sustainability performance indicators. *Field Crops Res.* 229: 103-114.
- Studdert, G.; H. Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1496-1503.
- Studdert, G.; H. Echeverría. 2002. Capítulo 14. Soja, girasol y maíz en los sistemas de cultivos en el sudeste bonaerense. En: Andrade F.; V. Sadras (Eds.). *Bases para el manejo del maíz el girasol y la soja*. 2da edición. INTA, FCA UNMP. 450 p.
- Studdert, G.; H. Echeverría; E. Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1466-1472.

Sun, S.; Q. Liu; R. Chan. 2006. Genetic engineering of crops for improved nutritional quality. En: Xu, Z.; J. Li; Y. Xue; W. Yang (Eds.). *Biotechnology and Sustainable Agriculture 2006 and Beyond*. Proceedings of the 11th IAPTC&B Congress, Beijing, China. 283-287 pp.

Sutton, M.; A. Bleeker; C. Howard; M. Bekunda; B. Grizzetti; W. De Vries; H. Van Grinsven; Y. Abrol; T. Adhya; G. Billen; E. Davidson; A. Datta; R. Diaz; J. Erisman; X. Liu, O. Oenema; C. Palm; N. Raghuram; S. Reis; R. Scholz; T. Sims; H. Westhoek; F. Zhang. 2013. Our nutrient world. The challenge to produce more food and energy with less pollution. *Global Overview of Nutrient Management*. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh on behalf of the Global Partnership on Nutrient Management and the International Nitrogen Initiative. GPNM, UNEP, INI. (Disponible: www.unep.org). Mayo 2017.

Sweeney, D. 1995. *Agriculture in the Middle Ages: Technology, Practice, and Representation*. University of Pennsylvania Press. Philadelphia. 374 p.

Syvitski, J.; C. Waters; J. Day; J. Milliman; C. Summerhayes; W. Steffen; J. Zalasiewicz; A. Cearreta; A. Gałuszka; I. Hajdas; M. Head; R. Leinfelder; J. McNeill; C. Poirier; N. Rose; W. Shotyk; M. Wagemann; M. Williams. 2020. Extraordinary human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950 CE initiated the proposed Anthropocene Epoch. *Communications Earth & Environment* 1:32. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y>

Taboada, M. 2017. Capítulo 3.1 Degradación de suelos. En: Andrade, F. (Ed). *Los desafíos de la agricultura argentina. Satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental*. Ediciones INTA. 120 p.

Ten Berge, H.; R. Hijbeek; M.P. Van Loon; J. Rurinda; K. Tesfaye; S. Zingore; P. Craufurd; J. Van Heerwaarden; F. Brentrup; J.J. Schröder, H.L. Boogaard; H.L.E. De Groot; M.K. Van Ittersum. 2019. Maize crop nutrient input requirements for food security in sub-Saharan Africa. *Global Food Security* 23: 9-21.

Tester, M.; P. Langridge. 2010. Breeding Technologies to increase crop production in a changing World. *Science* 327: 818-822.

Textile world. 2015. (Disponible: www.textileworld.com/textile-world). Julio 2016.

Thurow, L. 1996. *The future of capitalism*. William Morrow and Company Inc. 380 p.

Tian, N.; A. Fleurant; A. Kuimova; P. Wezeman; S. Wezeman. 2018. Trends in world military expenditure, 2017. Stockholm International Peace Res. Inst. (Disponible: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/sipri_fs_1805_milex_2017). Marzo 2020.

Tilman, D.; M. Clark. 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature* 515: 518-522.

Tilman, D.; K. Cassman; P. Matson; R. Naylor; S. Polasky. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418: 671-677.

Tilman, D.; R. Socolow; J. Foley; J. Hill; E. Larson; L. Lynd; S. Pacala; J. Reilly; T. Searchinger; C. Somerville; R. Williams. 2009. Beneficial Biofuels. The Food, Energy, and Environment Trilemma. *Science* 325: 270-271.

Tilman, D.; C. Balzer; J. Hill; B. Befort. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS* 108: 20260-20264.

Tittonell, P. 2013. *Farming systems ecology. Towards ecological intensification of world agriculture*. Wageningen University. 40 p.

Tittonell, P. 2014. Ecological intensification of agriculture-sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 8: 53-61.

Tittonell, P.; L. Klerkx; F. Baudron; G. Félix; A. Ruggia; D. van Apeldoorn; S.

- Dogliotti, P; Mapfumo; W. Rossing. 2016. Ecological Intensification: Local innovation to address global challenges. En: Lichtfouse, E. (Ed). Sustainable Agriculture Reviews 19. Springer, Cham.
- Tittonell, P. 2018. Chapter 13. Ecological Intensification of Agriculture. En: Agriculture & Food Systems to 2050. (Disponible: www.worldscientific.com). Marzo 2020.
- Toenniessen, G.; J. O 'Toole; J. De Vries. 2003. Advances in plant biotechnology and its adoption in developing countries. *Current Opinion in Plant Biology* 6: 191-198.
- Tollenaar, M.; E. Lee. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* 75: 161-169.
- Tomasello, M.; M. Carpenter; J. Call; T. Behne; H. Moll. 2005. Understanding and sharing intentions: the origin of cultural cognition. *Behavioral and Brain Sciences* 28: 675-691.
- Tomasello, M. 2010. ¿Por que cooperamos? Katz Editores. Buenos Aires. 188 p.
- Tonini, D.; H. Saveyn; D. Huygens. 2019. Environmental and health co-benefits for advanced phosphorus recovery. *Nature Sustainability* 2: 1051-1061.
- Tourn, S.; C. Videla; G. Studdert. 2019. Ecological agriculture intensification through crop-pasture rotations does improve aggregation of Southeastern-Pampas Mollisols Soil and Tillage Research 195: 104411.
- Townsend, A.; R. Howarth. 2010. Human acceleration of the global nitrogen cycle. *Scientific American* 302: 32-39.
- Trewavas, A. 2002. Malthus foiled again and again. *Nature* 418: 668-670.
- Tubb, C.; T. Seba. 2019. Rethinking Food and Agriculture 2020-2030. The Second Domestication of Plants and Animals, the Disruption of the Cow, and the Collapse of Industrial Livestock Farming. A RethinkX Sector Disruption Report. RethinkX: food@rethinkx.com.
- Tugore Ques, J. 2016. Los ganadores y perdedores de la globalización. Editorial RBA Barcelona. 142 p.
- Tulli, M.C.; D. Carmona; A. Vincini; V. Baquero; N. García. 2017. Incidencia del parasitismo de las larvas de *rachiplusia nu* (lepidoptera: noctuidae) en cultivos de soja con diferente manejo del hábitat. *Acta zoológica lilloana* 62: 107-109.
- Uhart, S.; F. Andrade. 1991. Source-sink relationship in maize grown in a cool temperate area. *Agronomie* 11: 863-875.
- Uhart, S.; F. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency and maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Sci.* 35: 1376-1383.
- UN. 2004. United Nations Population division. World population prospects. The 2004 revision. (Disponible: <http://www.un.org/esa/population/>). Julio 2016
- UN. 2008. United Nations Population division. World population prospects. The 2008 revision. (Disponible: <http://www.un.org/esa/population/>). Julio 2016.
- UN. 2012. United Nations Population division. World population prospects. The 2012 revision. (Disponible: <http://www.un.org/esa/population/>). Julio 2016.
- UN. 2015a. United Nations Population division. World population prospects. The 2015 revision. (Disponible: <http://www.un.org/esa/population/>). Julio 2016.
- UN. 2015b. Objetivos de desarrollo sostenible. Informe 2015. United Nations. Julio 2016.
- UN. 2019. United Nations Population division. World population prospects. The 2019 revision. (Disponible: <http://www.un.org/esa/population/>). Marzo 2020.

- UNCCC. 2015. United Nations Climate Change Conference. FCCC/CP/2015/L.9. Conference of the Parties. Twenty-first session. París.
- UNEP. 2013. United Nations Environment Programme. Global Chemicals Outlook. Towards Sound Management of Chemicals. UNEP. 245 p.
- UNEP. 2014. Assessing global land use: balancing consumption with sustainable supply. En: Bringezu, S.; H. Schütz; W. Pengue; M. O'Brien; F. Garcia; R. Sims; R. Howarth; L. Kauppi; M. Swilling; J. Herrick (eds.). A report of the Working Group on Land and Soils of the International Resource Panel. United Nations Environmental Programme. UNEP.
- Uphoff, N. 2002. The Agricultural Development Challenges we Face. En: Uphoff, N. (ed.). *Agroecological Innovations: Increasing Food Production with Participatory Development*. Earthscan. Londres.
- USCB. 2010. U.S. Census Bureau Historical Estimates of World Population. (Disponible: <http://www.census.gov/ipc/www/worldhis.html>). Julio 2016.
- Utsumi, S.; T. Katsube; T. Ishige; F. Takaiwa. 1997. Molecular design of soybean glycinin with enhanced food qualities and development of crops producing such glycinins. *Advances in Experimental Medicine and Biology* 415: 1-15.
- Valin, H.; P. Havlík; N. Forsell; S. Frank, A. Mosnier; D. Peters; C. Hamelinck; M. Spöttl; M. Van den Berg. 2013. Description of the GLOBIOM (IIASA) model and comparison with the MIRAGE-BioF (IFPRI) model. EC project ENER/C1/428-2012-LOT 2. Ecofys, Science for global insight, E4tech. 39 p.
- Van Asselt, M.; J. Rotmans; D. Rothman. 2005. *Scenario innovation*. Taylor and Francis. Londres. 203 p.
- Van den Bygaart, A. 2016. The myth that no-till can mitigate global climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 216: 98-99.
- Van der Linden, S.; A. Leiserowitz; S. Rosenthal; E. Maibach. 2017. Inoculating the Public against Misinformation about Climate Change. *Global Challenges* 1: 1600008.
- Van der Ree R.; D.J. Smith; C. Grilo. 2015. *Handbook of Road Ecology*. John Wiley and Sons, Ltd.
- Van Ittersum, M.; R. Hijbeek; H. Ten Berge; M. Van Loon; H. Boogaard; K. Tesfaye. 2019. Minimum emission pathways to triple Africa's cereal production by 2050. CCAFS Info Note. Wageningen, Netherlands: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).
- Van Groenigen, J.; C. Van Kessel; B. Hungate; O. Oenema; D. Powlson; K. Van Groenigen. 2017. Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma. *Environ. Sci. Technol.* 51: 4738-4739.
- Viglizzo, E. 2001. La trampa de Malthus. *Agricultura, competitividad y medio ambiente en el siglo XXI*. Eudeba. Universidad de Buenos Aires. 190 p.
- Viglizzo, E.; F. Frank; J. Bernardos; D. Buschiazzi; S. Cabo. 2006. A rapid method for assessing the environmental performance of commercial farms in the Pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment* 117: 109-134.
- Viglizzo, E.; F. Frank; L. Carreño; E. Jobbagy; H. Pereyra; J. Clatt; D. Pince; M. Ricard. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology* 17: 959-973.
- Violini, S. 2009. Evaluación del riesgo de mortandad de aves por el uso de pesticidas en el noreste de la provincia de La Pampa. Tesina, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa.
- Vogel, E.; M. Donat; L. Alexander; M. Meinshausen; D. Ray; D. Karoly; N. Meinshausen; K. Frieler. 2019. The effects of climate extremes on global agricultural yields. *Environ. Res. Lett.* 14: 054010.

- Vollset, S.; E. Goren; C. Yuan; J. Murray. 2020. Fertility, mortality, migration, and population scenarios for 195 countries and territories from 2017 to 2100: a forecasting analysis for the global burden of disease study. *The Lancet*. DOI:10.1016/S0140-6736(20)30677-2
- Vos, R.; L. Bellu. 2019. Capítulo 2. Global Trends and Challenges to Food and Agriculture into the 21st Century. *Sustainable food and agriculture*. FAO, Elsevier Inc.
- Wackernagel, M.; W. Rees. 1996. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island, BC: New Society Publishers.
- Wada, Y.; L. Van Beek; M. Bierkens. 2011. Modelling global water stress of the recent past: on the relative importance of trends in water demand and climate variability. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 3785–3805.
- Wall, L.; C. Bedano. 2020. Sistemas intensificados: efecto sobre indicadores biológicos de suelo. Capítulo 2.5 en Agosti M., et al. *Chacra Pergamino*. Informe final 2011-2020. Aapresid.
- Wallace, J. 2000. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agric Ecosyst Environ* 82: 105-119.
- Wallace, J.; P. Gregory. 2002. Water resources and their use in food production systems. *Aquatic Sci.* 64: 1-13.
- Watson, J.; F. Crick. 1953. Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. *Nature* 171: 737-738.
- Wei, W.; Q. Ayub; Y. Chen; S. Mc Carthy; Y. Hou; I. Carbone; Y. Xue; C. Tyler-Smith. 2013. A calibrated human Y-chromosomal phylogeny based on resequencing. *Genome Research* 23: 388-395.
- Wells, S. 2002. *The journey of men. A genetic odyssey*. Penguin books limited, Londres. 238 p.
- Wells, S. 2007. *Nuestros antepasados*. Genographic project. National Geographic Society. RBA libros, Barcelona. 287 p.
- West, P.; H. Gibbs; C. Monfreda; J. Wagner; C. Barford; S. Carpenter; J. Foley. 2010. Trading carbón for food: global comparison of carbón stocks vs. crop yields on agricultural land. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107: 19645-19648.
- Wheeler, T.; J. Von Braun. 2013. Climate Change Impacts on Global Food Security. *Science* 341: 508-513.
- WHO. 2018. Global Health Observatory (GHO) data: overweight and obesity. World Health Organization. (Disponible: http://www.who.int/gho/ncd/risk_factors/overweight_text/en/). Marzo 2020.
- Wilkinson, R.; K. Pickett. 2009. Income inequality and social dysfunction. *Annual Review of Sociology* 35: 493-511. Marzo 2020.
- Wolansky, M. 2011. Plaguicidas y salud humana. *Ciencia Hoy* 21: 23-29.
- Wolf, M. 2004. *Why Globalization Works*. New Haven: Yale University Press. 328 p.
- Wollenweber, B.; J. Porter; T. Lubberstedt. 2005. Need for multidisciplinary research towards a second green revolution. *Current Opinion in Plant Biology* 8: 337-341.
- Wolpoff, M.; R. Caspari. 1996. *Race and Human Evolution: A Fatal Attraction*. Simon and Schuster. Nueva York.
- Wood, B. 1992. Origin and evolution of the genus *Homo*. *Nature* 355: 783-790.
- World Bank. 2009. *Global Economic Prospects: Commodities at the Crossroads*. World Bank, Washington D. C. (Disponible: <http://siteresources.worldbank.org/INTGEP2009/Resources/>). Julio 2016.
- World Bank. 2018. *What a Waste 2.0. A global snapshot of solid waste management to 2050*. International Bank for Reconstruction and Development.

- The World Bank. Washington D. C. 272 p.
- Wrangham, R. 2017. Control of Fire in the Paleolithic: Evaluating the Cooking Hypothesis. *Current Anthropology* 58(S16): S303-S313.
- WRAP. 2008. Waste and Resources Action Programme. The food we waste. Food Waste Report. L. Ventour: Exodus market research. Wastes Work.
- WRI. 2007. World Resources Institute. Global biofuels demand. March 2007 monthly update. (Disponible: <http://earthtrends.wri.org>). Mayo 2017.
- Wright, A.; F. Hons. 2005. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 141-147.
- Wright, R. 2001. Non zero. The logic of human destiny. Vintage Books. 448 p.
- Wu, W.; Q. Yu; L. You; K. Chen; H. Tang; J. Liu. 2018. Global cropping intensity gaps: Increasing food production without cropland expansion. *Land Use Policy* 76: 515-525.
- WWF. 2016. Living planet report. WWF International. Gland, Suiza. (Disponible: www.panda.org). 146 p. Julio 2016.
- Xue, L.; G. Liu. 2019. Chapter 1. Introduction to global food losses and food waste. En: Galanakis, C.M. (Ed.). *Saving Food. Production, supply chain, food waste and food consumption*. Academic Press. Elsevier.
- You, L.; C. Ringler; U. Wood-Sichra; R. Robertson; S. Wood; T. Zhu; G. Nelson; Z. Guo; Y. Sun. 2011. What is the irrigation potential for Africa? A combined biophysical and socioeconomic approach. *Food Policy* 36: 770-782.
- Yu, Q.; W. Wu; L. You; T. Zhu; J. Vliet; P. Verburg; Z. Liu; Z. Li; P. Yang; Q. Zhou; H. Tang. 2017. Assessing the harvested area gap in China. *Agricultural Systems* 153: 212-220.
- Zaccagnini, M.E. 2006. ¿Por qué monitoreo ecotoxicológico de diversidad de aves en sistemas productivos? En: Larrea, E. (Ed.). *INTA Expone 2004, Volumen III*. Ediciones INTA. 69-89 pp.
- Zalasiewicz, J.; M. Williams; A. Haywood; M. Ellis. 2011. The Anthropocene: a new epoch of geological time? *Phil. Trans. R. Soc. A* 369, 835-841.
- Zhang, B.; H. Tian; C. Lu; S. Dangal; J. Yang; S. Pan. 2017. Global manure nitrogen production and application in cropland during 1860–2014: a 5 arcmin gridded global dataset for Earth system modeling. *Earth Syst. Sci. Data* 9: 667-678.
- Zhang, X.; E. Davidson; D. Mauzerall; T. Searchinger; P. Dumas; Y. Shen. 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528: 51-59.
- Zhang, X.; Q. Fang; T. Zhang; W. Ma; G. Velthof; Y. Hou; O. Oenema; F. Zhang. 2019. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis. *Global change biology* 26: 888-900.

Unidades utilizadas

m = metro

km = kilómetro

m² = metro cuadrado

ha = hectárea

km² = kilometro cuadrado

Mha = millones de hectáreas

j = joule

Mj = megajoule, 10⁶ joules

Gj = gigajoule, 10⁹ joules

Tj = terajoule, 10¹² joules

Ej = exajoule, 10¹⁸ joules

t = tonelada

Mt = megatón, 10⁶ t

Gt = gigaton, 10⁹ t

kcal = kilocaloría, 10³ cal

d = día

kg = kilogramo

cm³ = centímetro cúbico

m³ = metro cúbico

dam³ = decámetro cúbico

km³ = kilómetro cúbico

dm = decímetros

°C = grados centígrados

USD = dólares de Estados Unidos

g = gramo

µg = microgramo

mm = milímetro

l = litro

pl = plantas

% = porcentaje

Yr = rendimiento real

Yp = rendimiento potencial

eq CO₂ = equivalente CO₂

EB = exabyte (10¹⁸ bytes)

B = byte

Mev = megaelectron volt

Mt_{oe} = millones de t de equivalentes petróleo

ppm = partes por millón

Mips = millones de instrucciones por segundo

EG = equivalente grano

Abreviaturas utilizadas y símbolos utilizados

hab = habitante

PBI = producto bruto interno

ppa = paridad de poder adquisitivo o de compra

p.a. = principio activo
Cap = cápita
ADN = ácido desoxirribonucleico
a. C. = antes de Cristo
d. C. = después de Cristo
N.º = número
n veces = número de veces
CH₄ = metano
CO₂ = dióxido de carbono
N₂O = óxido nitroso
N = nitrógeno
P₂O₅ = óxido de fósforo
K₂O = óxido de potasio
P = fósforo
C = carbono
Zn = cinc
Ca = calcio
N₂ = nitrógeno atmosférico
DDT = dicloro difenil tricloroetano
2,4D = ácido 2,4-diclorofenoxiacético
3D = tres dimensiones
GEI = gases de efecto invernadero
ET = evapotranspiración
PA = productividad del agua
EC = eficiencia de captura
EUA = eficiencia de uso de agua
C₃ = plantas con metabolismo Carbono 3
Pp = precipitación
DIC = dependencia de importación de cereales
R² = coeficiente de determinación de una regresión

Esta edición es una ampliación de una anterior. Toma de la misma los temas relacionados con las innovaciones del pasado y los escenarios futuros y agrega una actualización bibliográfica, una descripción más detallada de los impactos ambientales de la agricultura, nuevas estimaciones de las futuras demandas de alimentos, y un análisis de las estrategias a las que podemos recurrir para satisfacerlas a nivel de cada continente. Pasados 10 años desde los momentos bases para las proyecciones a las que se hace referencia en la edición anterior, se realiza un análisis de la adecuación de las estimaciones a juzgar por los datos productivos y ambientales actuales. Se añaden, además, nuevas discusiones y elaboraciones acerca de los desafíos que enfrentamos en cuanto a romper la asociación entre producir y degradar, y a erradicar la pobreza. Entre las estrategias a implementar se consideran principalmente las basadas en tecnologías de procesos y de conocimientos que tienden a mayor producción, mayor productividad de recursos e insumos disponibles y menor impacto ambiental.



ISBN 978-987-8333-68-7



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina