

AGRICULTURA Y CAMBIO CLIMÁTICO: VUELTA A LA FRONTERA

Jesús Manuel Plaza Llorente

Profesor Facultad de CC. Económicas y Empresariales. UNED

*No creemos que el arado se entierre en como cantera que es la tierra del Llano.
Habría que hacer agujeros con el azadón para sembrar la semilla y
ni aun así es positivo que nazca nada; ni maíz ni nada nacerá.
(Juan Rulfo).*

RESUMEN

La tesis que sostiene este artículo es que la contribución de la Agricultura a la reducción de emisiones de gases con efecto invernadero (EGEI), supone ampliar la frontera tecnológica en la producción y distribución de alimentos, más que ampliar la superficie de cultivo planetaria. A partir del concepto de “Frontera Agraria”, y como metodología de trabajo, se realiza una revisión que analiza cómo los dos elementos de la Frontera Agraria (el territorial y el tecnológico) se han venido comportando a lo largo de los siglos. Evaluada la contribución empírica de 25 ámbitos tecnológicos identificados en agricultura para reducir EGEI, se concluye que su aplicación incremental será la que determine su eficacia, eficiencia en términos de coste-beneficio y equidad en el reparto del esfuerzo inevitable para su logro, entre los actores que participan en la cadena de valor agroalimentaria. La perspectiva histórica del devenir de las revoluciones agrarias seculares, ayudará a repensar la aplicación del paradigma de la Revolución Verde, en la perspectiva de cumplimiento de los objetivos de reducción EGEI para 2050.

1. INTRODUCCIÓN

Las acciones del ser humano, con las que contribuye a modificar el clima planetario, son el resultado de su afán de progreso y bienestar; bien que muy desigualmente distribuido entre la Especie. En cuanto a cómo afrontarlo, ya las organizaciones internacionales y los gobiernos han establecido líneas de acción que, no sin esfuerzo, tendrán que ser llevadas a la práctica en la búsqueda de soluciones (beneficios) individuales que devendrán después en colectivos.

Una de las parcelas que más ha puesto de actualidad el cambio climático es la de la producción de alimentos y la Agricultura en su conjunto. Inicialmente, la plasticidad que muestran los efectos de las sequías, las inundaciones y otros fenómenos climáticos o consecuencia de ellos son, además de reveladores por su dramatismo, profundamente mediáticos en nuestra sociedad de la información. Superado ese momento, la Agricultura aparece como parte del problema y, a la vez, de la solución. Si la principal causa de la alteración del clima planetario son la Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (EGEI), el conjunto de la actividad agropecuaria y forestal contribuye con algo más de la cuarta parte del total de EGEI (27%) y, cualitativamente, las emisiones de metano que proceden de ella (45%) y de gases nitrosos (80%), superan más que proporcionalmente su contribución global¹; no obstante haber disminuido las aportaciones EGEI un 20% desde 1990².

¹ Vid. Ahmed, J., *et al* (2020).

² Vid. García Rodríguez, M. (2021).

Expuestos los datos, la razón que los justifica es el modelo de producción y consumo de alimentos que se viene aplicado. Al respecto, conviene distinguir las imputaciones atribuibles a cada una de estas dos etapas. Por lo que se refiere al modelo de producción de alimentos, y como se demostrará en este artículo, continúa siendo en esencia el ancestral, aunque configurado modernamente a través del paradigma de la denominada Revolución Verde que comenzó Norman Borlaug en 1940 para, precisamente, aumentar la producción mundial de alimentos allí donde más se necesitaba. En cuanto al consumo de los mismos, su distribución resulta ser mucho más desigual. Todavía hoy un 9% de la población mundial pasa hambre a diario. Simultáneamente, el problema de la obesidad (particularmente la infantil) es pandémico y el mundo desperdicia alimentos por un importe anual de 750.000 millones de euros anuales (la tercera parte de lo producido), cuando con 260.000 millones podrían paliarse las hambrunas de nuestro tiempo, según el Programa Mundial de Alimentos (PMA)³.

Analizada la contribución de la Agricultura al problema, conviene abordar su parte en la solución. No puede ser otra sino la de continuar alimentando a la especie humana planetaria como viene haciendo desde el Neolítico, desde la reconsideración de los supuestos con que la Revolución Verde se ha venido aplicando hasta ahora, como se justificará en este trabajo. Este repensar la Revolución Verde, supone proponer medidas cuya aplicación no será fácil ni barata y que tampoco satisfará a todos por igual. Por esta razón, el orden y la gradualidad con que se apliquen determinarán su eficacia en el horizonte temporal fijado para 2050, su eficiencia en términos de coste-beneficio y la equidad en el reparto del esfuerzo inevitable para su logro, entre los actores que participan en la cadena de valor agroalimentaria. En opinión de este autor, y así se demostrará aquí, la perspectiva histórica del devenir de las revoluciones agrarias a lo largo de los siglos ayudará a comprender mejor este proceso de cambio.

Tras este primer epígrafe introductorio, el presente artículo se estructura a partir del concepto de Frontera en una doble acepción espacial y tecnológica, lo que se justifica en su segundo apartado. En el tercero, se realiza una síntesis histórica de las ampliaciones sucesivas de la frontera agraria hasta la Revolución Verde en 1940, configurándose ésta como una más de ellas. Un cuarto epígrafe, sirve para valorar la Revolución Verde en su perspectiva temporal hasta hoy, para, en el quinto apartado, abordar su papel en el contexto del cambio climático y de cumplimiento de los objetivos establecidos para 2050, a partir de datos empíricos procedentes de distintas investigaciones. Finalmente, el apartado de Conclusiones incide en la importancia del modelo incremental de transito que cabe abordar, antes de reseñarse la Bibliografía consultada.

2. VALOR SIMBÓLICO DEL CONCEPTO DE FRONTERA: LA FRONTERA AGRARIA

El concepto de “Frontera”, en su acepción tanto física como psicológica y de comportamiento humano a lo largo de la Historia, se toma como argumento en este artículo para, a través de él, explicar cómo su establecimiento sucesivo en el tiempo ha configurado la evolución de la Agricultura, y lo continuará haciendo, en el papel que represente en un escenario de cambio climático planetario.

Para los fines de este artículo, se define como “Frontera Agraria” el conjunto de interrelaciones que tienen lugar entre un espacio físico de naturaleza territorial (Frontera Física) y los elementos tecnológicos (Frontera Tecnológica) que, interactuando con la primera, dan lugar a la producción de alimentos, tanto de origen vegetal como animal. La Frontera Tecnológica la integran: la tecnología de semillas, la tecnología de los insumos productivos (energía, abonos y productos fitosanitarios), la tecnología de las máquinas (mecánicas y cibernéticas) y la tecnología del uso del agua en Agricultura. También, de forma añadida y en la medida en que las relaciones ente la producción agrícola y la ganadera se estrechan, se añade a la frontera tecnológica la selección y crianza de especies de abasto. Si bien la existencia de la Frontera Agraria, integrada por la Física y la Tecnológica, es recurrente

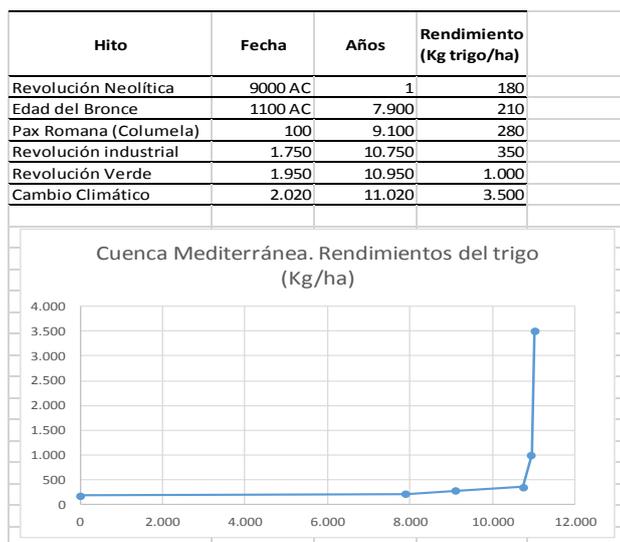
³ Vid. Tilman (2015).

como hecho estilizado a lo largo de la historia de la agricultura, también es cierto que no siempre se ha considerado que operaban como parte de un todo coordinado y que, la práctica histórica de producir alimentos, se servía de ambas de forma independiente. Como se verá después, no fue hasta la Revolución Verde (1940) cuando los componentes de la Frontera Tecnológica se aplicaron de forma explícita sobre la Frontera Física integrados en forma de Soluciones, Tecnología Apropriada o Paquetes Tecnológicos.

En su acepción física, inicialmente la frontera constituye la franja de terrero que separa una zona dedicada a actividades agrícolas o ganaderas de las tierras no cultivadas, por lo general zonas de bosque u otros ecosistemas naturales, que todavía no tienen afección económica. Una de las formas de explicar la colonización humana de los espacios naturales lo es mediante el estudio de los movimientos de la frontera agrícola y las causas de los mismos, como aparece en Nevis, Steele y Morris (1942, p. 27-29, 46, 175-176 y 309-312) para la América Septentrional durante la Edad Moderna; aunque aludiendo también al componente psicológico y de comportamiento de sus pobladores no indígenas que, por escasos⁴, forjaban una actitud individualista, pragmática y emprendedora; aunque solo fuera como elementos adaptativos para la supervivencia. Más allá del mito cinematográfico de la figura del poblador no indígena fronterizo (el pionero), la ampliación indiscriminada de la Frontera Física también constituye un factor causal del deterioro irreversible de los ecosistemas naturales cuando, una vez explotados, se abandonan por el propio desplazamiento de la frontera hacia otros, dejando tras de sí zonas degradadas.

El concepto de Frontera Agraria comprende ambas, Física y Tecnológica, para significar cómo el estado de la técnica (incluyendo la provisión de energía) también es capaz de ampliar las opciones productivas agrarias, tanto o más que la propia apertura de nuevos espacios para el cultivo o la cría de ganado, y siempre relacionada con ella. De hecho, ambas se muestran sintetizadas en el comportamiento histórico de las variables “Rendimiento de los cultivos” y “Población alimentada”. Si atendemos al Rendimiento de los Cultivos, y tomado como ejemplo los rendimientos del trigo en la Cuenca Mediterránea que muestra el Cuadro 1 y representa el gráfico correspondiente; es a partir de la Revolución Industrial con la ampliación de la frontera tecnológica (incorporación de nuevas prácticas culturales, el abonado mineral y la mecanización) cuando se manifiesta de forma espectacular el aumento de los rendimientos sobre una frontera física que se venía ampliando desde el Neolítico.

Cuadro 1. Evolución del rendimiento del trigo en la Cuenca Mediterránea

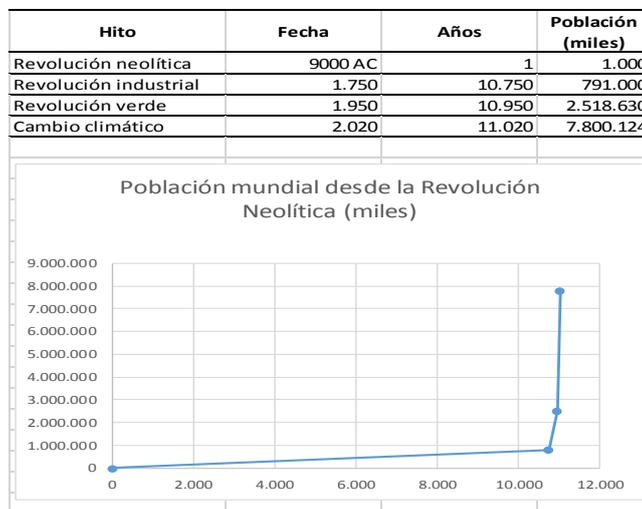


Fuente: Elaboración propia.

⁴ Durante la colonización europea de los EEUU de América Nevis, Steele y Morris (1942, p.175) cifran la densidad de población en la frontera en 6 habitantes por milla cuadrada; unos 2,3 habitantes por kilómetro cuadrado.

Por su parte, el aprovechamiento de los alimentos producidos por la población mundial, representada en el Cuadro 2 y su correspondiente gráfico, muestra el mismo perfil que el del primer cuadro; lo que corrobora cómo la especie humana ha venido integrando la combinación de las fronteras física y tecnológica para producir los alimentos que precisa.

Cuadro 2. Evolución de la población mundial



Fuente: Elaboración propia.

3. AMPLIACIÓN DE LA FRONTERA AGRARIA HASTA LA REVOLUCIÓN VERDE

Si sobre el Planeta vivirán los que éste pueda alimentar, la historia de la agricultura es la de la ampliación de la Frontera Agraria. Dicha ampliación ha tenido lugar compaginando los dos elementos indicados: el territorial y el tecnológico de forma que, según las épocas, uno se ha manifestado con mayor o menor intensidad sobre el otro, sin que ninguno de ellos haya dejado de manifestarse nunca. La razón por la que en unos periodos la componente territorial ha predominado sobre la tecnológica o viceversa, no es otra que el hecho de que ambas están sometidas a la Ley de Turgot de los Rendimientos Decrecientes y, de este equilibrio, la Humanidad siempre ha optado por la relación que le resultaba más favorable en cada momento entre las posibles.

Antes de la Revolución Neolítica, en el modelo de Caza y Recolección, la ampliación territorial presentaba enormes rendimientos frente a la tecnológica, en un entorno escasamente poblado y con grandes espacios físicos por colonizar, abundantes en alimentos fácilmente accesibles. Dicha combinación de factores, favorable a la ampliación de la frontera territorial, se mantuvo en el modelo de Roza y Quema, seguramente con una mejora incremental relativa de la componente tecnológica, frente a la del modelo precedente.

Después del 6000 a.C., cuando los cazadores y recolectores de alimentos vivían en cuevas, siguió una era de transición definida hacia una forma de vida basada en la agricultura, incluso antes de la invención de la alfarería. Los habitantes neolíticos de Cnoso (Creta) cultivaban diversas especies incluyendo trigo, cebada y legumbres, y criaban cabras, ganado vacuno y cerdos. Hacia el 5800 a.C. los ganaderos todavía utilizaban tipos antiguos de herramientas de piedra. Otro avance que se hace evidente en Sesklo (Tesalia) es la diversificación de la agricultura. Además de plantar trigo, cebada y mijo, los agricultores de este asentamiento cultivaban guisantes, algarrobas, almendras, higos, peras y bellotas (Cotterell, 1985).

Con la Revolución Neolítica, la componente tecnológica adquirió carta de naturaleza al materializarse como saber-hacer en la "Domesticación de Plantas"⁵ que, al aumentar el rendimiento

⁵ "Domesticación" significa que "la planta depende del ser humano para su reproducción" (Arranz-Otaegui *et al*, 2016).

alimentario sobre una superficie dada, contuvo siquiera temporalmente la ampliación territorial de la frontera agraria, y no fue hasta que dicho rendimiento decreció en relación con la población a alimentar, que de nuevo se produjeron migraciones que ampliaron más y más la expansión territorial de la Especie.

La domesticación de plantas, generalizada en todo el planeta como muestra el Cuadro 3, supuso una profunda alteración de los genomas vegetales, en lo que podría considerarse antecedente de la Tecnología de Semillas. Durante el proceso, se eliminaron características que eran esenciales para la supervivencia de la especie vegetal en su entorno silvestre, a cambio de conferirles caracteres de interés agronómico o productivo. Por esta razón, las especies o variedades cultivadas no se corresponden exactamente con las de sus hábitats naturales: todas han sido modificadas genéticamente.

Cuadro 3. Revolución Neolítica. Centros geográficos de domesticación de plantas

Oriente próximo	China	Sureste asiático	América central	América andina	África subsahariana
Trigo	Arroz	Leguminosas	Maíz	Patata	Sorgo
Cebada	Soja	grano	Guisante	Yuca	Mijo
Centeno	Colza	Pepino Berenjena	Calabaza	Cacahuete	Ñame (Batata)
Avena	Nabo	Coco	Pimiento	Pimiento	Café
Guisante	Melocotón	Naranja	Tomate	Calabaza	
Garbanzo	Té	Plátano	Cacao	Piña	
Lenteja					
Haba					
Vid					
Olivo					

Fuentes: Pericot y Maluquer (1982), Cotterell (1985) y Carbonero Zalduegui y García Olmedo (2002).

El proceso anterior, de ampliación interrelacionada entre las componentes tecnológica y territorial de la frontera agraria, descrito aquí de forma lineal con fines expositivos, no se manifestó simultáneamente en todas partes y, las mejoras técnicas que llevó implícita la mayor producción de alimentos, tampoco tuvieron lugar de forma sincrónica en todos los lugares. Por el contrario, la influencia del medio natural y los factores limitantes locales, tuvieron un papel relevante en el ritmo a que estos procesos se produjeron, así como en la formulación y aplicación de las soluciones técnicas a que dio lugar resolver cada problema particular.

Como manifestaciones del progreso en el uso de la tecnología de semillas, en el mediterráneo oriental (Creciente Fértil y en el yacimiento del Tell Qarassa, en Siria) se cosechaban cebada y trigo de variedades domésticas entre 10.700 y 10.200 años a.C., siendo una característica de tales especies o variedades la menor dehiscencia, lo que aumentaba (al reducir las pérdidas de grano) el rendimiento de los cultivos. El Farro (*Triticum turgidum dicoccon*) se cosechaba en Egipto 3000 a.C., siendo su genoma muy similar a las variedades de farro modernas cultivadas hoy en India, Omán y Turquía y, en el SE de la Península Ibérica (El Argar), en torno al 1700 a.C la cebada constituía el 75% de la dieta. En el caso de América, entre 7000-5000 a.C. se fecha en Méjico central el cultivo de la calabaza, pimiento y frijol y 3000 a.C. el del maíz; 2000 a.C. en Perú para la calabaza, pimiento, lima y algodón; 1200 a.C. para el maíz en el Valle del Mississippi y 1000 a.C. para la mandioca, batata y cacahuete, en las selvas de Venezuela.

La ampliación de frontera territorial durante el Neolítico y la Edad del Bronce, se acompañaba de obras de conservación de suelos como el aterrazado de laderas y la transformación en regadío, dependiendo de las zonas, estando datado el riego en la Península Ibérica 2000 años a.C. El continuo de mejora tecnológica incremental también se extendía a labores de cultivo, como la práctica del desfonde con laya o azadón plano, así como el labrado múltiple de los barbechos (arada, rastreo y bina o terciá), a que aluden Virgilio y Plinio para la cuenca mediterránea en el siglo I. Un siglo antes, en el

Norte de Europa, ya se usaba el arado pesado con tracción animal, datándose el empleo de la vertedera en zonas dialectales germánicas y eslavas entre los siglos V y X de nuestra era. Los siglos XI a XIII conocieron grandes roturaciones con la generalización del arado moderno de hierro y, en Al-Andalus, acequias, norias y sifones testimoniaban el progreso tecnológico alcanzado en el uso económico del agua.

Este conjunto de avances continuó durante el Renacimiento y la Edad Moderna, hasta generalizarse con la Revolución Industrial, sin que por ello cesara la ampliación de la frontera agrícola territorial a que dieron lugar, primero, la colonización europea de Meso y Suramérica y, años después, la de América Septentrional y Asia⁶. La mejora de los aperos y su mayor robustez a partir de las innovaciones de la tecnología metalúrgica (1730, arado de Rotterdam), permitió acometer obras mecánicas de conservación de suelos más ambiciosas y habilitar para el cultivo fajas, bancales y terrazas. También, la mejora tecnológica permitía roturar suelos fuertes y profundos, mejorando el drenaje de los friales con tubería de barro cocido (Sistema Deanston), generalizándose la elevación de agua mediante la rueda hidráulica y la noria de cangilones. En este entorno, el agrónomo escocés Jethro Tull (1672-1741) inventó la sembradora mecánica de tracción animal. Como impulsor de la innovación agraria, difundió sus ideas en 1731 a través del libro: "The New Horse-Hoeing Husbandry".

Desde el siglo XVIII, aumentaron las prácticas destinadas a mantener la fertilidad del suelo con fines de intensificación de cultivos mediante el abonado animal, introduciéndose alternativas y rotaciones (sistema Norfolk, en 1720). Townshend (1674-1738) implanta en Inglaterra el cultivo de trébol y raíces de invierno sustituyendo al barbecho. En paralelo, la investigación en mejora vegetal lleva a Linneo (1707-1778) a publicar su taxonomía de plantas, y comienzan los experimentos de hibridación que culminarían en 1865 con los trabajos de Mendel. Antes, Bakewell (1725-1795), había enunciado los principios científicos de la alimentación animal. En Francia e Inglaterra surgen las primeras empresas comercializadoras de semillas (Vilmorin y Vietch) y se introducen los abonos fosfatados. En Alemania, Liebig publica en 1845 "La química en su aplicación a la agricultura", que se verá acompañada por la mecanización creciente del agro: primero con tracción animal y después mecánica. Para entonces, en 1862, Abraham Lincoln había previsto la necesidad de difundir entre los agricultores el nuevo saber tecnológico, creando una oficina para que se ocupara de ello, precursora de lo que serían después la Extensión Agraria y, en nuestros días, la Transferencia de Conocimiento.

Si ya en 1636 Van Berg había patentado la trilladora, precediendo a Tull como inventor agrario, el siglo XVIII conoce avances en el empleo de maquinaria y equipo agrícola: 1788 Meike, con la trilladora de tambor rotativo, y en 1794 Cooke, con la cortadora rotativa para forraje; hasta 1799 en que se introducen las primeras segadoras mecánicas a vapor. Los progresos en la tecnología del uso de la fuerza del vapor, logrados durante el XIX, permiten nuevos desarrollos: 1826 segadora de Bellen; 1834 cosechadora a vapor de McCormick; 1836 patente de la cosechadora combinada siega-trilla para trigo; 1850 patente de la desmotadora de algodón; 1859 locomotor de Aveling y, en 1875, aparición de la engavilladora mecánica, precediendo al motor de combustión interna (1880) y a los primeros tractores equipados con él en 1890.

4. LA AMPLIACIÓN DE LA FRONTERA AGRARIA CON LA REVOLUCIÓN VERDE

⁶ Se constata la existencia de un progreso tecnológico lento en la agricultura desde la Antigüedad hasta la Revolución Industrial, siquiera en Europa. Al respecto, valgan dos citas: "En realidad, a nivel de fuerzas productivas sólo ha habido dos cambios en la historia de la humanidad: la Revolución Neolítica, que se verifica en el VIII milenio a.C. y la Revolución Industrial, que inicia su desarrollo en la Inglaterra del siglo XVIII. Entre una y otra, la historia de los pueblos ha sido principalmente una historia agrícola. Quizás hoy estemos asistiendo a un nuevo salto cualitativo: la revolución cibernética (García Martín, 1989; p. 43)." "La explotación agropecuaria era deudora de un utillaje arcaico y unos sistemas de cultivo tradicionales a los que costaba trabajo renovarse por la escasa calidad de la superficie labrada y sus bajos rendimientos (García Martín, 1989; p. 181)."

Dentro del marco conceptual de la Frontera Agraria que desarrolla este artículo, y de modo retrospectivo, corresponde a Norman Borlaug (1914-2009) haber desarrollado y aplicado con éxito la componente de Frontera Tecnológica en un conjunto que integraba la tecnología de semillas (variedades de alto rendimiento), la de insumos, la mecanización y el regadío (Luelmo, 1975; p.361). Doctorado en protección vegetal a los 27 años, Borlaug consiguió hacer de Méjico un país autosuficiente en granos básicos entre 1940 y 1956. Para ello trabajó en la mejora de los cultivos, desarrollando una cepa robusta de trigo -trigo enano– que, adaptada a las condiciones mejicanas primero, permitió después desarrollar variedades que se generalizaron en otros lugares, España incluida (Fusi, 1980; Martínez, *et al*, 1982).

Si bien la expresión "Revolución Verde" estará siempre vinculada a Borlaug, el término fue acuñado por William Gaud en 1968. Gaud, había trabajado para la agencia de cooperación para el desarrollo de los EEUU (USAID) y quiso diferenciar el contenido de la "revolución verde"; por contraposición a otras revoluciones⁷ surgidas en aquellos años en el contexto histórico de la Guerra Fría.

Las aportaciones innovadoras de Borlaug consiguieron, además de aumentar los rendimientos en la producción de trigo, adaptar ciertas variedades a condiciones agronómicas muy diversas (García Olmedo, 1999), convirtiéndose en asesor muy solicitado en países cuya producción de alimentos no se alineaba con el crecimiento demográfico. En 1970 fue laureado con el Premio Nobel de la Paz, por su compromiso en la lucha contra el hambre y la desnutrición en los países menos desarrollados. Una síntesis del contexto de las aportaciones de Borlaug, figuran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Hitos de la Revolución Verde: antecedentes y episodios colaterales

- 1910. Comercialización del tractor a gasoil en EEUU.
- 1914. Nace Norman Borlaug.
- 1917. En Inglaterra el tractor desplaza a la tracción animal.
- 1920. Wallace crea Pioneer Inc para producir y comercializar maíz híbrido.
- 1939. Cosechadora elevadora de patatas.
- 1941. Norman Borlaug obtiene el doctorado por la Universidad de Minnesota.
- 1940-1950. Trabajos de Norman Borlaug en Méjico. Fecha histórico del comienzo de la Revolución Verde.
- 1943. Borlaug introduce nuevos sistemas de cultivo de trigo en Sonora (Méjico).
- 1943. Cosechadora de remolacha azucarera.
- 1950-1970. El rendimiento del trigo en Méjico aumenta de 750 a 3200 Kg/ha.
- 1956. En Argentina se crea el Instituto de Tecnología Agropecuaria.
- 1958. Mejora genética del arroz en el International Rice Research Institute (IRRI; los Baños, Filipinas).
- 1959. Méjico. Creación del Centro Internacional de Mejoramiento del Trigo y del Maíz (CIMMYT).
- 1961. Borlaug asesora al gobierno indio. Evaluación de nuevas técnicas de cultivo de arroz en el Punjab.
- 1962. Rachel Carson publica "Silent Spring", Crest Book, NY (USA).
- 1965. Borlaug introduce los "trigos CIMMYT" en la India y Paquistán.
- 1968. William Gaud (USAID) acuña el término "Revolución Verde".
- 1968. S.K. De Datta publicita el éxito en India y otros lugares de Asia de la variedad IR8 "Milagro del arroz".
- 1970. Norman Borlaug es galardonado con el Premio Nobel de la Paz.
- 1971. Montague Yudelman, publica "The Green Revolution". The OECD Observer, nº 32. June 1971. París.
- 1972. José Vergara Doncel se hace eco del artículo de Yudelman aplicado al caso español e Iberoamericano en: "Obstáculos para el desarrollo rural en Iberoamérica y España". REEAS, nº 79. Madrid, pág. 71-86.
- 1982. El laboratorio de genética de la Universidad de Gante (Bélgica) introduce genes foráneos en plantas.
- 1983. Primera planta transgénica. Aislamiento e introducción de un gen en el genoma de E. Coli.
- 1984. Desde 1940 la producción mundial de granos básicos aumenta un 250%.
- 1986. Monsanto crea la primera planta genéticamente modificada (tabaco resistente a la Kanamicina).
- 1994. Se aprueba la comercialización del primer alimento modificado genéticamente (tomates Flavr Savr).
- 1996. EEUU admite la comercialización de las variedades Soja RR y Maíz RR, resistentes al Glifosato.
- 1996. Se alcanza el millón de Has cultivadas con semillas transgénicas.
- 2002. Se alcanzan los 50 millones de Has cultivadas con semillas transgénicas.

⁷ Revolución: desbordamiento de un orden previamente establecido que implica la transferencia de un estado de poder desde un liderazgo a otro y que puede implicar la reestructuración radical de las relaciones sociales y económicas (McLean, 1996).

2009. Muere Norman Borlaug.
 2012. Desde 1961 la superficie planetaria regada pasó de 139 a 320 millones de Has.

Fuente: Elaboración propia.

Pese a sus sombras (Carson, 1962; Sebrell, 1967 p.124; Yudelman, 1971), hoy, el paradigma de la Revolución Verde continúa siendo válido para afrontar la inseguridad alimentaria de 800 millones de seres humanos, permitiendo encauzar un amplio y necesario programa de investigación y desarrollo en terrenos como: biotecnología, control integrado de plagas y nutrientes, tratamientos post cosecha, producción ganadera y acuicultura, entre otros. En síntesis, el balance de la Revolución Verde hasta nuestros días puede resumirse como figura en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Balance de la Revolución Verde (1940-2020) en la producción mundial de alimentos

Pros	Contras
<p>Aumento de la producción de alimentos, aunque sin conseguir resolver el problema de la inseguridad alimentaria para 800 millones de personas en el mundo (2200 calorías diarias por persona). En EEUU, los 17 cultivos principales multiplicaron su producción por 2,4 entre 1940 y 1980. Entre 1952 y 1992, la disponibilidad global de granos básicos por habitante y año en los países desarrollados pasó de 250 a 350 Kg, y de 170 a 250 Kg en los países en desarrollo.</p> <p>Se estima que, por cada dólar gastado en semillas, fertilizantes, riego y otros insumos, se obtienen cuatro en forma de producto.</p> <p>Contribuye favorablemente a la transición demográfica.</p> <p>Permite transferir tecnología entre países con diferente nivel de desarrollo.</p> <p>Aporta incentivos para la investigación, la mejora tecnológica y la innovación: plantas transgénicas resistentes a factores adversos, nuevas técnicas de acondicionamiento previo de las semillas y tratamientos químicos más selectivos y en dosis más reducidas.</p> <p>Incentiva la mejora de la gestión tecnológica, gerencial y comercial de las explotaciones agrarias.</p>	<p>Encarece la producción de alimentos para los productores, sin asegurar la reducción de su coste para los consumidores como consecuencia del aumento de la oferta.</p> <p>Eventualmente proporciona menor calidad nutricional de los alimentos, existiendo un <i>trade-off</i> entre cantidad y calidad.</p> <p>Es causa de contaminación ambiental derivada del uso de agroquímicos y abonos minerales: “Se hace necesaria la obtención de nuevas variedades cultivadas que sean de mayor rendimiento, menos sensibles a factores adversos y que requieran menos tratamientos agroquímicos” (García Olmedo, 1999).</p> <p>Esquilmo de suelos. Salinización.</p> <p>Menor biodiversidad. Deforestación.</p> <p>Mayor consumo de agua (riegos).</p> <p>Aumento de la dependencia tecnológica de los países pobres por causa de la aparición de monopolios en el lado de la oferta de insumos, incluyendo la semilla mejorada.</p> <p>No evita la aparición de nuevas plagas y enfermedades y genera resistencia en las tradicionales.</p> <p>Pérdida de eficiencia energética: “antes de 1910 se obtenían de la agricultura más calorías que las que se invertían en ella. En 1970, se necesitaban 8 calorías de combustibles fósiles para producir una caloría de alimentos” (Harris, 2001).</p>

Fuente: Elaboración propia.

Simultáneamente, la Revolución Verde precisa hacerse sostenible en los sistemas naturales sobre los que se aplica (FAO, 1996; pág.19). Dicha sostenibilidad depende de la contribución armónica de los componentes de Capital que incorpora: Natural, Humano, Institucional y Social, reseñados en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Revolución Verde. Factores de sostenibilidad

Capital natural	Esfuerzo sostenido en investigación, desarrollo e innovación. Apuesta por el control integrado de plagas (IPM) y la gestión integrada de nutrientes (INM). Apuesta por los bancos de germoplasma vegetal y animal, como garantía de biodiversidad. Apuesta para evitar la degradación y empobrecimiento del suelo. Conservación y rehabilitación de suelos degradados. Mejora de la gestión del agua y racionalización del riego.
Capital humano	La adecuada capacitación de las personas que trabajan en la agricultura constituye un incentivo para adoptar sistemas de cultivo más productivos (Schultz, 1964; Capítulo 12, pág. 150 a 175).
Capital institucional	Apuesta por la mejora y modernización de las explotaciones y empresas agroalimentarias. Puesta al día de los servicios de Extensión, Capacitación y de otros mecanismos de transferencia de tecnología al agro. Los mecanismos institucionales de crédito a la agricultura, aseguramiento del riesgo y buen funcionamiento de los mercados deben estar alineados con la mejora tecnológica y la gestión de las explotaciones.
Capital social	Apuesta por esquemas de alimentación saludable que contribuya a racionalizar las producciones agrarias y evitar desperdiciar alimentos.

Fuente: Elaboración propia a partir de FAO (1996).

5. Cambio climático y sostenibilidad de la agricultura: ampliar de nuevo la frontera agraria

5.1. Objetivos de neutralidad EGEI en el horizonte de 2050

Existe consenso entre la comunidad científica de que, conseguir la neutralidad de EGEI para 2050 en el Planeta, es la mejor manera de abordar los riesgos que ya manifiesta el cambio climático (García Rodríguez, 2021), cuya caracterización se muestra en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Caracterización del cambio climático

<p>Efectos incrementales. Sobre la línea de base de 2020, se prevé que su impacto para 2050 esté entre 2 y 20 veces el conocido hasta hoy.</p> <p>Manifestación espacial dispersa e irregular. La relevancia del impacto del cambio climático es marcadamente local.</p> <p>No se prevé alcance un estado estacionario en un futuro cercano o previsible. Sus efectos son incrementales, tienden a prolongarse en el tiempo y se sabe poco acerca del efecto combinado entre varios de ellos.</p> <p>No linealidad. De acuerdo con los postulados y modelos procedentes de la Teoría del Caos o de la Complejidad, los sistemas inducidos o afectados por el cambio climático - con alta probabilidad -, poseen dependencia sensible de las condiciones iniciales (<i>Efecto Mariposa</i>). Algunos ejemplos son analizados por Woetzel <i>et al</i> (2020b).</p> <p>Impacto sistémico desde un ámbito limitado hasta el global. Esto, como consecuencia de sus efectos incrementales, de manifestación local, no estacionarios y susceptibles de trasladarse con distinta intensidad y de diversas formas entre biosistemas.</p> <p>Conlleva Efecto Mateo. Sus consecuencias serán peores para los sistemas humanos, económicos o físicos más vulnerables o con debilidades de partida⁸.</p>
--

Fuente: Elaboración propia a partir de Woetzel *et al* (2020a).

Se estima que, con una probabilidad del 67%, sería posible contener el aumento de la temperatura global del planeta por debajo de 1,5°C sobre su nivel preindustrial, si el nivel de CO₂ acumulado en la atmósfera fuera del 570 Gigatoneladas, lo que supondría un nivel neto de emisiones cero en 2050. Un aumento de la temperatura global mayor de 1,5°C, implicaría cambios irreversibles con efectos potencialmente catastróficos al menos en algunas regiones del Planeta.

5.2. Desafíos del cambio climático para la producción de alimentos

⁸ La expresión “Efecto Mateo” ha hecho fortuna en la literatura económica, a partir del contenido bíblico en Mt 25,29.

La evidencia de los datos disponibles sobre el origen y evolución del cambio climático, del que el calentamiento global es una de sus principales manifestaciones, sitúan a la agricultura en la encrucijada de producir alimentos para la población mundial y, simultáneamente, hacerlo de manera sostenible (McKinsey Quaterly, 2020).

Un entorno con menos especies es menos productivo y más vulnerable. Si en los próximos 30 años la población mundial alcanzase los 11.000 millones de habitantes, es imposible que puedan alimentarse de acuerdo con los estándares occidentales de consumo, estimándose que la demanda mundial de alimentos per capita crecerá entre el 8 y el 12%. Ya hoy, la mitad de la superficie terrestre del planeta se dedica a producir alimentos, pero no será suficiente; estimándose que se necesitarán del orden de 983 millones de Has adicionales (una superficie equivalente a la de EEUU). Dicha superficie sólo puede obtenerse a partir de las selvas, bosques y sabanas existentes. El problema a resolver es cómo evitar la deforestación de 20 millones de has anuales, aumentando la productividad del suelo en la superficie de cultivo existente, en la que los rendimientos apenas alcanzan el 20% de su potencial, sobre todo en los países llamados pobres (Tilman, 2015).

5.3. *Desafíos del cambio climático para una agricultura sostenible*

En el escenario que configuran los puntos anteriores, en el transcurso de los próximos 30 años, una agricultura sostenible deberá adaptar planteamientos; quizá pospuestos o abordados de forma insuficiente hasta ahora, pero que son señalados por la literatura y que, a continuación, se reseñan de forma sumaria.

Modificación de las infraestructuras productivas. Cada año se pierden 12 millones de hectáreas cultivables por el avance de la desertificación (FAO). Eventualmente, el aumento del nivel del mar alterará los sistemas productivos de rivera como consecuencia de la aparición de nuevas zonas inundables. Estos hechos inducen la posibilidad de asistir a medio y largo plazo a desplazamientos poblacionales y a una reconfiguración de las opciones productivas en amplias zonas del planeta.

Cambios en parámetros de alta sensibilidad para la producción alimentaria, con incremento de las temperaturas medias y episodios de olas de calor, alteración del régimen de precipitaciones incluyendo sequías, huracanes y otros episodios climáticos extremos⁹.

Aumento de la probabilidad de alteración de los rendimientos de las cosechas fuera de los límites conocidos, al alza o a la baja. Se estima que episodios productivos con oscilaciones de hasta el 15% de los rendimientos medios conocidos, podrían producirse al menos una vez por década¹⁰. En el caso de la pesca, y como consecuencia del aumento de la temperatura del agua, el rendimiento de las capturas en el Atlántico Norte podría ser hasta un 35% inferior (Woetzel *et al*, 2020a).

Amenaza para los sistemas agrícolas tradicionales. El calentamiento global desplazará los límites geográfico-climáticos de los cultivos fuera de los conocidos, sin que todavía sea haya valorado

⁹ En la actualidad se calcula que el cambio climático ya ha afectado a los parámetros básicos de un 25% de la superficie terrestre sobre los que tenía en el período 1901-1925. Se estima que, para 2050, el porcentaje de la superficie terrestre inmersa en cambios de origen climático será del 45%. (Woetzel *et al*, 2020a, p.27). Las previsiones para España enfatizan las dificultades que ocasionará el cambio climático sobre el aumento de la frecuencia y duración de los episodios de sequía, y la disponibilidad y gestión del agua dulce, entre otras (CES, 2021, p. 126 y 127, citando fuentes del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación-MAPA).

¹⁰ Para el periodo 2030-2050, la probabilidad anual de que se produzca una reducción del 10% o superior de los rendimientos medios de los cultivos de trigo, maíz, soja y arroz sobre los actuales, se incrementará entre el 6 y el 18%. De forma asimétrica, la banda de probabilidad de que las cosechas fueran un 10% mayor que las actuales, estaría entre el 6 y el 11%. Como puede apreciarse, en conjunto, estas previsiones configuran un escenario pesimista; al pronosticar una variabilidad mayor en las producciones a la baja frente a la existente hoy, aunque sin definir todavía un patrón de distribución territorial para estos fenómenos (Woetzel *et al*, 2020a; Woetzel *et al*, 2020c).

su impacto. Para el caso del viñedo, se cita el de sus límites septentrionales entre 10 y 30 kilómetros por década, lo que podría ser fuente tanto de amenazas como de oportunidades. El problema es la transición: cuánto va a durar y cómo gestionarla. En el caso de los granos básicos, y en la hipótesis de un aumento de la producción del 100% entre 2005 y 2050, su sostenibilidad deberá proceder principalmente de las regiones cuyos rendimientos todavía tienen potencial de crecimiento, mediante la intensificación del uso del suelo y la incorporación de tecnología; más que de la puesta en cultivo de nuevas superficies (*land clearing*) (Tilman et al, 2011).

El cambio climático conduce a una reconfiguración de las opciones productivas. Woetzel *et al* (2020a) estiman que hasta un 60% de la producción mundial de alimentos podría concentrarse en apenas 5 regiones del planeta: EEUU-Canadá, Brasil-Argentina, Noroeste de Europa, Sur de Rusia-Ucrania, Norte de la India-China oriental. Pero, esta concentración, sería mucho más acentuada para determinados cultivos, como muestra el Cuadro 8.

Cuadro 8. Cultivos principales. Concentración de la producción mundial entre 2015 y 2017

Cultivo (1)	Porcentaje sobre el total (%)	Países o regiones productoras
Maíz	58	EEUU (34%), China (24%).
Arroz	60	China (28%), India (22%), Indonesia (10%).
Soja	81	EEUU (34%), Brasil (30%), Argentina (17%).
Trigo	58	China (18%), India (12%), NO Europa (11%), Rusia (10%), EEUU (7%).
(1). Estos cuatro cultivos proporcionan la mitad de las calorías necesarias en la dieta humana. De ellas, el trigo un 19% y el arroz un 18%.		

Fuente: Woetzel *et al*, 2020c

Las cadenas de valor, globales o regionales, y las infraestructuras de producción, logística y comerciales que las soportan, están diseñadas para las condiciones climáticas actuales. Un cambio en ellas exigirá su reconfiguración, siendo uno de los primeros impactos el aumento de costes que acarreará su adaptación a las condiciones venideras (Woetzel *et al*, 2020b).

5.4. Papel de la agricultura en la reducción de EGEEI: repensar la Revolución Verde

Las investigaciones realizadas sobre la adaptación de la agricultura a las condiciones de sostenibilidad que requiere su contribución para reducir las EGEEI, señalan cuatro ámbitos tecnológicos preferentes: uso de maquinaria y equipo, tecnologías de cultivo, enmiendas y fertilizantes y producciones ganaderas que, respectivamente, agrupan 6, 5, 5 y 9 medidas cuya síntesis¹¹ recoge el Cuadro 9.

¹¹ El conjunto de los datos reseñados procede de Ahmed, J. *et al* (2020; p. 13 y 29-41) que recoge las investigaciones de base que los fundamentan.

**Cuadro 9. Agricultura, ganadería, pesca y bosques.
Medidas para reducir EGEI en el horizonte de 2050**

Medida	25 Medidas identificadas como las de mayor impacto para reducir las emisiones con efecto invernadero (CO ₂ , CH ₄ y NO _x) en el horizonte de 2050	20 años potencial reducción (MMt CO ₂)	20 años ahorro (-) o coste (+) (\$/tCO ₂ e)
Uso de maquinaria y equipo			
1	Emisiones cero en maquinaria y equipo	537,0	-229,0
4	Siembra directa	217,0	-41,0
5	Laboreo mínimo	119,0	-41,0
24	Implantación de riego localizado	55,0	147,0
7	Eficiencia en dispositivos de pesca	17,0	-12,0
6	Mantenimiento de equipos	16,0	-34,0
Tecnologías de cultivo			
16	Racionalización del abonado del arroz	449,0	3,0
8	Gestión del agua en arrozales	296,0	-12,0
9	Gestión de residuos de arroz	148,0	-8,0
14	Optimización uso de variedades arroz	90,0	0,0
15	Fijación de nitrógeno en rotaciones	14,0	0,0
Enmiendas y fertilizantes			
3	Racionalización uso fertilizantes China e India	88,0	-97,0
19	Fertilización controlada	75,0	65,0
2	Tasa variable de fertilización	47,0	-176,0
18	Fertilización racional	45,0	40,0
25	Enmienda de suelos	18,0	523,0
Producciones ganaderas			
12	Mejora animal reducción gases entéricos	506,0	0,0
10	Mejora de la sanidad animal	411,0	-5,0
23	Optimización de la alimentación animal	370,0	131,0
20	Racionalización de correctores para animales	299,0	88,0
21	Digestión anaeróbica del estiércol	260,0	92,0
11	Mejora de la digestibilidad de granos	219,0	-3,0
22	Mejora de las producciones ganaderas	180,0	119,0
17	Inhibidores de nitrógeno en pastos	123,0	15,0
13	Mejora de la alimentación animal	47,0	0,0
Media		185,8	22,6
SD		346,5	161,9
Coefficiente de variación (%)		186,4	716,5
Coefficiente de correlación			-0,2
Coefficiente de determinación (%)			5,1
Fuente: elaboración propia a partir de Ahmed, et al (2020).			

Dichas medidas aparecen ordenadas, dentro de su ámbito, de mayor a menor impacto estimado en la reducción de EGEI (eficacia), medido en megatoneladas equivalentes de CO₂. En paralelo, y para cada una de ellas, se ha estimado el ahorro (-) o coste (+) que tendría su aplicación en el horizonte 2050 de neutralidad de emisiones, medido en US\$/tCO₂. El Índice de Correlación entre la reducción de emisiones y su coste estimado (-0,2) y su correspondiente Coeficiente de Determinación (5,1%) indican: en primer lugar, que la eficacia de las medidas propuestas apenas dependería en un 5,1% del mayor ahorro o coste que supusieran, lo que haría depender el restante 94,9% de su eficacia de otros factores (o de la combinación de otros factores), lo que configura un escenario de incertidumbre cuyos límites queda precisar por investigaciones futuras. En segundo lugar, el signo negativo de la correlación señala al ahorro de costes como efecto económico predominante de impacto en la eficacia del conjunto de las medidas, frente a los desembolsos que supondría aplicarlas en el escenario de reducción de EGEI.

Un análisis pormenorizado de los ámbitos tecnológicos en los que cabe agrupar las 25 medidas propuestas, cruzado con los elementos básicos que configuran el paradigma de la Revolución Verde, y

recogido en el Cuadro 10, muestra su alineación plena; en el sentido de que será la forma de aplicación de los supuestos de la Revolución Verde los que la revelen como instrumento útil en su contribución a la reducción de EGEI para la agricultura en el horizonte de 2050.

Cuadro 10. Alineamiento entre medidas de reducción de EGEI y los desarrollos impulsados por la Revolución Verde

Desarrollos impulsados por la Revolución Verde	Producción agrícola y ganadera. Medidas impulsadas para reducir las EGEI			
	Vinculadas al uso de maquinaria y equipo (1, 4, 5, 24, 7, 6)	Tecnologías de cultivo (16, 8, 9, 14, 15)	Enmiendas y fertilizantes (3, 19, 2, 18, 25)	Vinculadas a las producciones ganaderas (12, 10, 23, 20, 21, 11, 22, 17, 13)
Tecnología de semillas y mejora vegetal	X	X	X	
Aplicación de abonos minerales y enmiendas	X	X	X	
Aplicación de productos fitosanitarios, complementos o medicamentos animales	X	X		X
Maquinaria, equipo y energía	X	X	X	X

Nota: la numeración de las medidas de reducción de las EGEI, se corresponde con la que figura en el Cuadro 9.

Fuente: Elaboración propia.

De forma adicional, la aplicación de este conjunto de medidas se verá favorecido por la incorporación de elementos tecnológicos adicionales incorporados, procedentes del *big data*, la inteligencia artificial, la robótica y los nuevos materiales.

6. CONCLUSIONES

A partir de los datos reunidos y analizados en este trabajo cabe concluir, en primer término, que el papel a desempeñar por la Agricultura vinculado al cumplimiento de los objetivos de la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero en el horizonte 2050, no difiere sustancialmente del que ha tenido desde la Revolución Neolítica a lo largo de la Historia, con alguna restricción. Durante los últimos 12.000 años la Agricultura, entendida hoy como cadena de valor destinada a producir y distribuir los alimentos que precisa la raza humana habitante del Planeta, ha afrontado cambios climáticos y su práctica se ha adaptado a las diferentes situaciones mediante la ampliación de la Frontera Agraria, en su doble vertiente de Frontera Física (roturación y puesta en cultivo de espacios naturales) y de Frontera Tecnológica intensificando la producción, mediante la tecnología de semillas (secuencia: domesticación-mejora vegetal-modificación genética), aplicación de abonos (primero orgánicos, después minerales), aplicación de productos fitosanitarios para las plantas y medicamentos y complementos alimenticios para animales domésticos, mecanización que optimizaba las disponibilidades energéticas motrices en cada momento histórico, y mediante la tecnología del agua aplicada a la transformación en regadío.

En la ocasión que suscita en cambio climático que sucede en nuestros días, y a diferencia de otras situaciones históricas, la Agricultura contribuye con el 27% de las EGEI y, cualitativamente, su aportación de metano y gases nitrosos es mayor. Consecuentemente, su papel como proveedor de alimentos a la Humanidad, lo tendrá que seguir cumpliendo con la restricción que impone la neutralidad de emisiones. En este sentido, los datos disponibles llevan a distinguir en la contribución al cumplimiento de los objetivos fijados, la fase productiva (bajo el paradigma de la Revolución Verde) y la de distribución y consumo de alimentos, en la que llama la atención el desperdicio alimentario unido a la hambruna crónica de (todavía) 800 millones de seres humanos.

Una segunda conclusión es que, a la luz de las investigaciones recientes consultadas para la elaboración de este artículo, y en cumplimiento del objetivo de neutralidad de emisiones por la agricultura en el horizonte 2050, parece necesario compatibilizar a escala planetaria (una vez más) la ampliación de la frontera física y la tecnológica.

Por lo que se refiere a ampliar la frontera física, es evidente el alto coste en biodiversidad que puede tener hacerlo en determinadas zonas del Planeta, unido a su eficiencia relativa en términos de reducción de emisiones pues, la mera roturación de nuevos espacios y su preparación para el cultivo constituye, en sí misma, fuente de EGEI. De forma adicional, también resultaría contradictoria la roturación de espacios forestales con la estrategia de creación de sumideros adicionales de carbono. En cuanto a la ampliación de la frontera tecnológica agraria, su contribución al objetivo de reducción de las EGEI se muestra potencialmente como la más eficaz y eficiente. Eficacia, derivada de la experiencia de 80 años de Revolución Verde cuyo paradigma (adaptado localmente a las condiciones del momento), continúa siendo válido. Y eficiencia, consecuente con la existencia de un acervo de capital físico, humano y de saber-hacer; capaz de generar economías de escala y soluciones técnica y económicamente factibles en el nivel local para afrontar la puesta en práctica de, al menos, 25 medidas que la investigación ha revelado como de mayor impacto para reducir de las EGEI, clasificadas en el quinto apartado de este artículo. Sin embargo, el esfuerzo de su aplicación en términos de ahorro o coste apenas explicaría el 5,1% de su eficacia en términos de reducción de EGEI al nivel de conocimiento actual, lo que abre un espacio para investigar la contribución causal del 94,9% restante.

Una tercera conclusión de este trabajo señala que, reducir la contribución de la agricultura al calentamiento global requiere cambios en cómo se produce (repensar y adaptar localmente el paradigma de la Revolución Verde), qué se come y cuánto se desperdicia, unido a mejorar la gestión forestal en la perspectiva de creación o aumento de sumideros de carbono atmosférico, para lo que la innovación tecnológica debe contribuir a asegurar una producción suficiente, equilibrada nutricionalmente y sostenible de alimentos.

También, y como cuarta conclusión, resulta evidente el hecho de que la producción alimentaria es un sujeto político de primer orden a lo largo de la Historia, y de ahí su puesta de actualidad con motivo del cambio climático. La estabilidad social e institucional es propia de pueblos sin hambre, como factor necesario. Y el poder político lo sabe, al menos desde la Edad del Bronce; cuando los reyes cretenses edificaban sus palacios sobre las cistas en las que almacenaban el grano.

7. BIBLIOGRAFÍA

- AHMED, J., ALMEIDA, E., AMINETZAH, D., DENIS, N., HENDERSON, K., KATZ, J., KITCHEL, H., MANNION, P. (2020): "Agriculture and climate change". *Mckinsey & Company*, p. 52.
- ARRANZ-OTAEGUI, A. COLLEDGEB, S., ZAPATAC, L., TEIRA-MAYOLINID, L., IBÁÑEZ, J. (2016): "Regional diversity on the timing for the initial appearance of cereal cultivation and domestication in southwest Asia". *PNAS*. December 6, 2016. Vol. 113, N°. 49, p. 14001–14006. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1612797113
- CARBONERO ZALDUEGUI, P., GARCÍA OLMEDO, F. (2002): "Las plantas bajo el dominio del hombre". *Fundación Juan March. Boletín informativo* nº 328 (pág. 28-32) y 329 (p. 32-37).
- CARSON, R. (1962): *Silent Spring*. Crest Book, NY (USA).
- CONSEJO ECONÓMICO Y SOCIAL (2021): *Informe 02/2021. Un medio rural vivo y sostenible*. p. 126-127.
- COTTERELL, A. (1985): *Los orígenes de la civilización europea*. Editorial Crítica. Grupo editorial Grijalbo. Barcelona. p. 296. Capítulo 1, 2 y 3. (p. 13-100).
- FAO (1996): *Lessons from the green revolution: towards a new green revolution. Technical background document*. World Food Summit. 13-17 November. Rome. Italy, p. 21.

- FUSI AIZPURÚA, J.P. (1980): *Historia de España. De 1960 a 1977. La Revolución Verde en España*. Tomo 13 (p. 19). Historia 16.
- GARCÍA MARTÍN, P. (1989): *El mundo rural en la Europa moderna*. Biblioteca Historia 16, nº 8. Madrid, p. 216.
- GARCÍA OLMEDO, F. (1999): “Aplicación de la ingeniería genética a la mejora de las plantas cultivadas”. *Vida Rural*, 1 de marzo de 1999, p. 74-75.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M. (2021): “La lucha contra el cambio climático y la agricultura”. *Economistas*, nº 171. Febrero, 2021 Madrid. p. 37-44.
- HARRIS, M. (2001): *Antropología Cultural*. Alianza, p. 122.
- LUELMO, J. (1975): *Historia de la agricultura en Europa y América*. Ediciones Istmo. Madrid, p. 469.
- MARTÍNEZ, J., MAS, M., PARICIO, J., PÉREZ, F., QUESADA, J., REIG, E. (1982): “La modernización del sector agrario”. Capítulo 2 en *Economía española: 1960-1980. Crecimiento y cambio estructural*. Hermann Blume, p. 59-79.
- MCKINSEY QUATERLY. (2020): “Feeding the world sustainably”. *McKinsey & Company*, p. 13.
- McLean, I. (1996): *Oxford. Concise dictionary of politics*. Oxford University Press, p. 559.
- NEVIS, A., STEELE, H., MORRIS, J. (1942): *A Pocket History of the United States*. Simon&Schuster Inc. NY (USA). Novena edición. Agosto de 1992, p. 719.
- PERICOT, L., MALUQUER DE MONTES, J. (1982): *La humanidad prehistórica*. Salvat Editores, S.A. Estella (Navarra), pág. 196. Introducción y Capítulos 4 y 5.
- SCHULTZ, T. W. (1964): *Transforming traditional agriculture*. Yale University Press. (Edición española de 1967, *Modernización de la agricultura*. Editorial Aguilar. Barcelona, p. 184).
- SEBRELL, W. (1967): “¿Podremos alimentar al mundo?” *Technological Innovation and Society*. Versión española: *La innovación tecnológica y la sociedad*. Manuales UTEHA. Nº 357/doble. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México, p. 115-148.
- TILMAN, D., BALZER, CH., HILL, J., BEFORT, B. (2011): “Global food demand and sustainable intensification of agriculture”. *PNAS*. December 13th, 2011, vol. 108, no. 50, p. 20260–20264. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1116437108
- TILMAN, D. (2015): “El gran desafío es de dónde sacar terreno para alimentarnos”. Entrevista de Manuel G. Pascual. *Cinco Días*. Madrid, 29 de junio de 2015.
- WOETZEL, J., PINNER, D., SAMANDARI, H., ENGEL, H., KRISHNAN, M., BOLAND, B., POWIS, C. (2020a): “Climate risk and response. Physical hazards and socioeconomics impacts”. *McKinsey Global Institute*, p. 37.
- WOETZEL, J., PINNER, D., SAMANDARI, H., ENGEL, H., KRISHNAN, M., KAMPEL, C., GRAABAT, J. (2020b): “Could climate become the weak link in your supply chain? Case study”. *McKinsey Global Institute*, p. 28.
- WOETZEL, J., PINNER, D., SAMANDARI, H., ENGEL, H., KRISHNAN, M., DENIS, N., MELZER, T. (2020c): “Will the world’s breadbaskets become less reliable?” *McKinsey Global Institute*, p. 23.
- YUDELMAN, M. (1971): “The Green Revolution”. *The OECD Observer*, nº 32, p 15-18 y 27-30. París.