



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

PERSPECTIVAS ECONÓMICAS DEL SECTOR AGROPECUARIO DE MÉXICO HASTA EL AÑO 2050

T E S I S

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

Presenta:

JAVIER MEDINA HERNÁNDEZ

Bajo la supervisión del: DR. IGNACIO CAAMAL CAUICH.

Chapingo, Estado de México, México, a octubre del 2024.

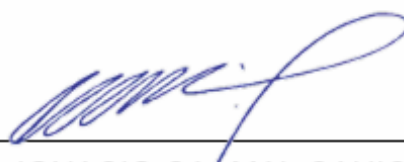


**PERSPECTIVAS ECONÓMICAS DEL SECTOR AGROPECUARIO DE
MÉXICO HASTA EL AÑO 2050**

Tesis realizada por **JAVIER MEDINA HERNÁNDEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR:



DR. IGNACIO CAAMAL CAUICH

ASESOR:



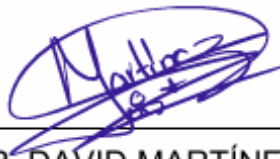
DRA. VERNA GRICEL PAT FERNÁNDEZ

ASESOR:



DR. JOSÉ ANTONIO ÁVILA DORANTES

LECTOR EXTERNO:



DR. DAVID MARTÍNEZ LUIS

Chapingo, Estado de México, México, a octubre del 2024.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE APÉNDICES	IX
ABREVIATURAS USADAS	XII
DEDICATORIAS.....	XII
AGRADECIMIENTOS	XIII
DATOS BIOGRÁFICOS	XV
RESUMEN GENERAL	XVIII
GENERAL ABSTRACT.....	XIX
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos particulares.....	5
1.4 Hipótesis	6
1.5 Estructura del documento	6
1.6 Literatura citada	9
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	12
2.1 Perspectivas económicas y desafíos mundiales.....	12

2.1.1	Evolución de la Agricultura en el mundo: Las cinco revoluciones históricas	14
2.1.2	Agricultura 1.0	15
2.1.3	Agricultura 2.0	17
2.1.4	Agricultura 3.0	20
2.1.5	Agricultura 4.0	24
2.1.6	Agricultura 5.0	29
	Definición de Agricultura 5.0	30
	La Agricultura 5.0 iniciará una nueva Revolución Agrícola Superinteligente	31
2.2	Geopolítica en la Agricultura 5.0: Competencia entre las potencias mundiales por la Inteligencia Artificial más Avanzada	37
2.2.1	Líderes mundiales en AGI y Agricultura 5.0	38
	Estados Unidos: Potencia de la innovación y la agroindustria	38
	China: AGI al servicio del campo y la agrícola del futuro	39
	La Unión Europea: Sostenibilidad y agricultura inteligente	41
	Emiratos Árabes Unidos: Hacia un futuro agrícola moderno y sostenible en el desierto.....	42
	Israel: Innovación en tecnologías de ahorro de agua.....	44
2.3	Impacto de la AGI en la Sociedad 5.0, Industria 5.0 y Agricultura 5.0 .	46
2.4	La Agricultura 5.0 en las Economías en Desarrollo y Emergentes	47
2.5	Perspectivas Agrícolas de la OCDE-FAO en el corto plazo	48
2.5.1	Perspectivas Agrícolas de 1999	49
	Pronósticos Clave al 2004 (OECD & FAO, 1999):	49
2.5.2	Perspectivas Agrícolas de 2024	50
	Pronósticos Clave al 2033 (OECD & FAO, 2024):	50
2.5.3	Relación directa de las Perspectivas Agrícolas de la OECD-FAO	51
	Similitudes:.....	51

Diferencias:	52
Logros:	52
Pendientes:	53
2.6 El pasado y presente del Sector Agropecuario de México.....	54
2.6.1 Una visión al pasado del campo mexicano	54
La agricultura tradicional y el México precolonial	56
La agricultura colonial dominando la agricultura tradicional en México...	59
Revolución Verde: globalización y modernización agrícola en México ...	60
2.6.2 Situación actual del Sector Agropecuario de México	63
2.7 Perspectivas Económicas del Sector Agropecuario de México	67
2.7.1 El futuro del Sector Agropecuario de México	67
2.7.2 Métodos para obtener pronósticos en variables clave	69
2.8 Literatura citada	76

CAPÍTULO III. EL FUTURO DE LA ALIMENTACIÓN MUNDIAL: LOS CULTIVOS DOMINANTES EN LA AGRICULTURA 5.0..... 102

3.1 Introducción	103
3.2 Materiales y métodos.....	105
3.3 Resultados.....	106
3.4 Discusión	110
3.5 Conclusiones	113
3.7 Bibliografía.....	113

CAPÍTULO IV. CURRENT CHALLENGES AND FORECASTS IN MAIZE GRAIN PRODUCTION AND CONSUMPTION IN MEXICO 117

4.1 Abstract	117
4. 2 Introduction	117
4. 3 Materials and Methods	118

4.3.1	Data set.....	118
4.3.2	Time series analysis.....	118
4.3.3	Recurrent Neural Networks	118
4. 4	Results and Discussion	119
4.4.1	World scope of maize grain production.....	119
4.4.2	Production and consumption perspectives of maize in Mexico	120
4. 5	Conclusions	123
4. 6	Aknowledgements	123
4. 7	References	123
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES		125
5.1	Recomendaciones.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Los tipos de Agricultura y las diferencias clave entre la Agricultura 4.0 y la Agricultura 5.0.....	15
Figura 2-2. Comportamiento histórico de la capacidad destructiva humana vinculado a los avances tecnológicos.	47
Figura 2-3. Mapa de la ubicación de Mēxihco-Tenochtitlan, ahora Ciudad de México (CDMX). México significa “en el ombligo del mundo”.....	55
Figura 2-4. Provincias y alcance de la Tripe Alianza antes de la llegada de los españoles: Texcoco, Tlacopan y México-Tenochtitlán.	57
Figura 2-5. Representación de una neurona del cerebro humano y el movimiento que realizan los impulsos nerviosos.....	73
Figura 3-1. Los cultivos que dominaron la producción agrícola en el año 2021.	106
Figura 3-2. La superficie cosechada de los principales cultivos producidos en el año 2021.	107
Figura 3-3. Los rendimientos de los principales cultivos producidos en el año 2021.	108
Figura 3-4. Comportamiento de la producción agrícola en cultivos dominantes, 1961-2021.	109
Figura 3-5. Pronósticos al 2050 de la producción en los cultivos dominantes.	110

Figura 4-1. Architecture of a recurrent neural network for short- and long-term memory analysis (RNN-LSTM). Source: elaborated by the authors with information from Greff <i>et al.</i> (2017) and Abbasimehr <i>et al.</i> (2020).	119
Figura 4-2. Behavior of maize grain production in the main producing countries and world total, 1961-2021. Source: elaborated by the authors using data from FAO (2023).	119
Figura 4-3. Historical behavior of apparent consumption, production, imports, and exports of maize grain in Mexico, 1961-2021. Source: elaborated by the authors using data from FAO (2023).	120
Figura 4-4. The states in Mexico with the highest production of maize grain in 2021. Source: elaborated by the authors using data from SIAP (2023b).	121
Figura 4-5. The states in Mexico with the largest harvested area of maize grain in 2021. Source: elaborated by the authors using data from SIAP (2023b).	121
Figura 4-6. Behavior of the domestic yield of maize grain in Mexico, 1961-2021. Source: elaborated by the authors using data from FAO (2023).	122
Figura 4-7. Forecasts for the year 2050 of the export, import, production and apparent consumption of grain corn in Mexico. Source: elaborated by the authors using data [1990 and 2020] from FAO (2023).	122

LISTA DE APÉNDICES

Publicaciones y difusión científica	130
1.- IV Seminario Internacional de Economía y Desarrollo: Problemas del Crecimiento Económico en América Latina y El Caribe	130
2.- XII Congreso Internacional y XXVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas (CINCA)	131
3.- XII Congreso Internacional y XXVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas (CINCA)	132
4.- III Seminario Internacional de Economía y Desarrollo: Problemas del Crecimiento Económico en América Latina y El Caribe	133
5.- Ponencia en el Módulo Aprendizaje de Máquina para Modelado de Datos en la Universidad Anáhuac.	134

ABREVIATURAS USADAS

AGI	Inteligencia Artificial General (Artificial General Intelligence)
AgTech	Tecnología Agrícola (Agricultural Technology)
BM	Banco Mundial (World Bank)
CDMX	Ciudad de México
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CONAHCyT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social
DCEA	Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola
DICEA	División de Ciencias Económico Administrativas
DL	Aprendizaje Profundo (Deep Learning)
EUA	Estados Unidos de América (United States of America)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization)
ha	Hectárea
IA	Inteligencia Artificial
I+D	Investigación y Desarrollo (Research and Development)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IoT	Internet de las Cosas (Internet of Things)
LSTM	Memoria a Largo Corto Plazo (Long Short-Term Memory)

M	Millones
Mg	Megagramos (Megagrams)
M Mg	Millones de megagramos (Millions of megagrams)
Mha	Millones de hectáreas
ML	Aprendizaje Automático (Machine Learning)
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (Organization for Economic Co-operation and Development)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible (Sustainable Development Goals)
ONU	Organización de las Naciones Unidas (United Nations)
RNA	Redes Neuronales Artificiales (Artificial Neural Networks)
RNP	Redes Neuronales Profundas (Deep Neural Networks)
RNR	Redes Neuronales Recurrentes (Recurrent Neural Networks, RNN)
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
UACH	Universidad Autónoma Chapingo
UAE	Emiratos Árabes Unidos (United Arab Emirates)
UE	Unión Europea (European Union)
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture)



DEDICATORIAS

★

Para ti.

Que lees e investigas. Y a tu futuro... que espera para sorprenderte... ¡Les dedico esta obra!

¡A ti! Que vivirás en una permacrisis global dominada por tokens, el oro digital del futuro. Un universo infinito de datos, creado por alguna IA avanzada: Inteligencia Artificial General (Artificial General Intelligence, AGI), Superinteligencia Segura (Safe Superintelligence, SSI), Superinteligencia Artificial (Artificial Superintelligence, ASI) y la omnisciente y omnipresente Singularidad (Singularity).

Los desafíos, serán el combustible de tu curiosidad... Multiplicándose como fractales cuánticos, en mundos virtuales, con una realidad inexistente, y que no creías que fuera posible.

Esta nueva vida, con robots humanoides... te deshumanizará ¡Evolucionarás! (Eso espero).

Para ti, que siempre recuerdas:

Estudiar, para observar más allá de lo habitual.

¡Más allá, de la era de las IA's!

★

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos aquellos que me brindaron su apoyo y colaboración para que fuera posible la realización de esta obra científica, con visión a futuro.

Principalmente, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Ignacio Caamal Cauich por su excepcional y acertada orientación como mi director de tesis. Asimismo, quiero reconocer a la Dra. Verna Gricel Pat Fernández y al Dr. José Antonio Ávila Dorantes por su valiosa contribución como miembros de mi Comité Asesor. Su colaboración, consejos, comprensión y ánimos fueron fundamentales para culminar con éxito este trabajo de investigación.

Al Dr. David Martínez Luis por colaborar como Lector Externo para revisar mi Documento de Grado. Su apoyo, colaboración y recomendaciones fueron vitales para finalizar este trabajo de investigación. Le quedo muy agradecido.

Al Dr. Juan Hernández Ortiz y al Dr. Ramón Valdivia Alcalá por su aprobación, confianza y guía a lo largo de todo el proceso académico y de investigación. Igualmente, a la secretaria Rosario Estrada por su paciencia y valiosas sugerencias. Les agradezco mucho.

A mis maestros que, a pesar de las difíciles circunstancias derivadas de la pandemia del COVID-19, lograron fortalecer mis conocimientos y habilidades mediante su dedicada docencia, tanto en las clases a distancia como en las clases presenciales. Sus enseñanzas ampliaron mi perspectiva, por eso, gracias.

A mi esposa, por estar ahí en los momentos cruciales, por tu amor que me impulsó a continuar y por enriquecer esta investigación con tus loables aportes. A mi hermosa e inteligente bebé, Eva, eres mi corazón y el motivo insustituible que impactó positivamente en mi vida. Muchas gracias, mis amores.

A mis padres, hermanos, sobrinos, familiares, amigos y conocidos. Su presencia en mis historias de vida y sus constantes palabras de aliento han sido primordiales para orientar mis pensamientos y sentimientos en un camino que, finalmente, me condujo al éxito académico y científico. Terminar esto, es el éxito. Les expreso mi más sentido agradecimiento.

A mis compañeros del DCEA: José Gilberto Cortes Ramírez, Karen Lucero Cruz Herrera, Ángeles Suhgey Garay Jacome, Natividad Hernández Mendoza, Jonathan Hernández Pérez, Jesdel Hernández Toscano, Andrés Aurelio López Santiago, Federico Augusto Toledo Ruiz, Yamilet Valencia Sánchez, Fernando Elester Vázquez Ayanegui, Juan Salvador Vázquez Muñoz por compartir alegrías, conocimientos y logros. Mis mejores deseos en su vida profesional.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por su respaldo financiero, el cual fue esencial para la consecución satisfactoria de mis estudios de doctorado. Esta investigación representa mi firme compromiso con la excelencia académica y con el pueblo de México.

Para finalizar, quiero expresar la gratitud más pura y que nace de mi corazón a la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), la institución agronómica, ganadera y forestal más importante de México. Mi alma mater me recibió con las manos abiertas, brindándome la oportunidad de lograr mi objetivo de vida: convertirme en investigador y especialista del futuro del Sector Agropecuario y Forestal de México. Las instalaciones, el personal, los docentes, los recursos, los viajes de estudio y el intercambio académico internacional que realicé durante mis estudios en la UACH fueron trascendentales para mi formación. Por todo esto y más...

¡MUCHAS GRACIAS!

Universidad Autónoma Chapingo

DATOS BIOGRÁFICOS

Javier Medina Hernández originario de Morelia, Michoacán de Ocampo, de los Estados Unidos Mexicanos. Su Educación Básica la realizó de 1994 al 2004 en Zinapécuaro, Michoacán: Preescolar Comunitario Benito Juárez, Escuela Primaria Pública Rafael Ramírez y Esc. Sec. Fed. “Lic. Rafael Carrillo”.



A lo largo de su trayectoria laboral de seis años, tuvo la oportunidad de desempeñarse en los tres sectores de la actividad económica de México. En el Sector Primario, trabajó en la producción avícola. En el Sector Secundario, estuvo involucrado en la industria textil y la construcción. Finalmente, en el Sector Terciario, laboró como mesero en un restaurante, además de dedicarse al comercio de una amplia variedad de plantas ornamentales y árboles frutales.

En el año 2010, retomó sus estudios de nivel Medio-Superior en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), institución ubicada en Texcoco, Estado de México. Determinación motivada por su interés en especializarse en la investigación y enseñanza agrícola de México y el mundo (Nunca es tarde para retomar tus estudios y avanzar en tu preparación, especialmente cuando tienes la determinación y un objetivo de vida definido).

Inició su Educación Superior en el 2013, en el Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Fitotecnia de la UACH. En el 2017, obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia con una investigación sobre la prospectiva del Sector Agropecuario mexicano para el año 2050 mediante el uso de Redes Neuronales Artificiales.

Posteriormente, cursó la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, en la División de Ciencias Forestales de la misma universidad, obteniendo el Grado de Maestro en el 2020 con la tesis titulada: “Proyecciones hasta el año 2100 de variables clave en el sector forestal de México y su análisis en la política pública”.

En 2020, ingresó al Programa de Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola, concluyendo satisfactoriamente sus estudios doctorales en el año 2024 con la presente investigación.

Publicaciones y difusión científica (Ver Anexo A):

Agricultura 5.0 en México: Una transformación de la Agricultura 4.0 a un futuro sostenible. Ponencia realizada en el IV Seminario Internacional de Economía y Desarrollo: Problemas del Crecimiento Económico en América Latina y El Caribe en septiembre del año 2024. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

Current challenges and forecasts in maize grain production and consumption in Mexico. Artículo científico publicado en la revista Agro Productividad, 17(5):165-172. Mayo de 2024. Colegio de Posgraduados, Montecillo, Estado de México, México. DOI: 10.32854/agrop.v17i5.2741

Alimentar al mundo en el año 2050: los cultivos dominantes. Esta conferencia se presentó en el CINCA: XII Congreso Internacional y XXVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas, en abril del año 2024. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

El Sector Forestal de México hasta el año 2100: Proyecciones de variables clave. La presentación de los resultados de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales se expuso en el CINCA: XII Congreso Internacional y XXVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas, en abril del año 2024. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

Desafíos actuales y pronósticos de la producción y consumo de maíz en México. Ponencia realizada en el III Seminario Internacional de Economía y Desarrollo: Problemas del Crecimiento Económico en América Latina y El Caribe en septiembre del año 2023. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

Proyecciones hasta el año 2100 de variables clave en el sector forestal de México y su análisis en la política pública. Participación, con la ponencia, en el módulo Aprendizaje de Máquina para Modelado de Datos, de la Universidad Anáhuac en marzo de 2023. Huixquilucan, Estado de México, México.

Proyecciones hasta el año 2100 de variables clave en el sector forestal de México y su análisis en la política pública. Tesis de Maestría realizada en el Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, en mayo del año 2020. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

Prospectiva del Sector Agropecuario de México para el 2050 con el uso de redes neuronales artificiales. Tesis de Licenciatura que fue requisito para obtener el título de Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia, en el año 2017. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

*“it’s not that the future is going to happen so fast,
it’s that the past happened so slow.”*

Sam Altman, 2024.

*Hoy, vivimos la verdadera fuerza del progreso:
ya no esperamos el siguiente avance, suceden constantemente...
En el pasado, teníamos tiempo de sentir el ritmo de la vida.
¿Qué significará ser humano... en un futuro dominado por IA’s?*

Javier Medina Hernández, 2024.

RESUMEN GENERAL

PERSPECTIVAS ECONÓMICAS DEL SECTOR AGROPECUARIO DE MÉXICO HASTA EL AÑO 2050¹

La Agricultura 5.0 transformará al Sector Agropecuario global hacia el año 2050. Esta nueva Revolución Agrícola, sin precedentes, integra tecnologías de vanguardia que permiten una automatización casi completa de los procesos productivos. A diferencia de la Agricultura 4.0, que depende del trabajo de las personas para garantizar la eficiencia y el control de las operaciones. México, un país con una amplia historia de cambios en la agricultura y un panorama socioeconómico contrastante ¿estará preparado para adoptar la Agricultura 5.0? En este contexto complejo, el objetivo del trabajo fue analizar las perspectivas económicas del Sector Agropecuario de México hasta 2050, para guiar decisiones ante desafíos actuales y futuros. Los datos se descargaron de fuentes oficiales y se analizaron en gráficos y mapas. Se realizaron pronósticos al 2050 en Python, con redes neuronales recurrentes (LSTM). En 2021, la caña de azúcar, maíz grano, arroz, trigo y palma aceitera fueron los cultivos dominantes en la producción mundial. El maíz es un cultivo de gran relevancia económica, cultural y gastronómica del mundo. Aunque México es el centro de origen y domesticación del maíz, no es competitivo en rendimientos, producción ni exportaciones, y depende de las importaciones de maíz amarillo de Estados Unidos. En 2050, se pronostica mayor eficiencia, rendimientos y producción agrícola por la adopción tecnológica, como Inteligencia Artificial General, Robots Superinteligentes, Biotecnología, Impresión 3D, Nanotecnología, Computación Cuántica y Gemelos Digitales. Además, el año 2050 simboliza los nuevos desafíos globales que enfrentará México: oligopolios agroalimentarios, desigualdades económicas, ciberseguridad, dependencia tecnológica, inversión elevada, desempleo generalizado, degradación ambiental, cambio climático y producción alimentaria sostenible para una población en aumento. Se requieren políticas públicas adaptadas a cada región y tipo de productor para garantizar soberanía alimentaria, formación continua, nuevos empleos, adopción tecnológica, restauración agroecológica, conservación de cultivos nativos y métodos agrícolas tradicionales para un futuro sostenible.

Palabras clave: Revolución Agrícola Superinteligente, Futuro Sostenible, Agricultura 5.0, Inteligencia Artificial Avanzada, Desafíos Globales.

¹ Tesis de Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Javier Medina Hernández.
Director de Tesis: Dr. Ignacio Caamal Cauich.

GENERAL ABSTRACT

ECONOMIC OUTLOOK FOR MEXICO'S AGRICULTURAL SECTOR THROUGH 2050¹

Agriculture 5.0 will transform the global agricultural sector through 2050. This unprecedented new Agricultural Revolution integrates cutting-edge technologies that allow for almost complete automation of production processes. Unlike Agriculture 4.0, which depends on the work of people to ensure efficiency and control of operations. Will Mexico, a country with a long history of changes in agriculture and a contrasting socioeconomic panorama, be ready to adopt Agriculture 5.0? In this complex context, the objective of the study was to analyze the economic prospects of the agricultural sector in Mexico through 2050, to guide decisions in the face of current and future challenges. The data was downloaded from official sources and analyzed in graphs and maps. Forecasts were made by 2050 in Python, with recurrent neural networks (LSTM). In 2021, sugar cane, maize grain, rice, wheat and palm oil were the dominant crops in world production. Corn is a crop of great economic, cultural and gastronomic relevance in the world. Although Mexico is the center of origin and domestication of corn, it is not competitive in yields, production, or exports, and depends on imports of yellow maize grain from the United States. In 2050, greater efficiency, yields, and agricultural production are predicted due to technological adoption, such as Artificial General Intelligence, Superintelligent Robots, Biotechnology, 3D Printing, Nanotechnology, Quantum Computing, and Digital Twins. In addition, the year 2050 symbolizes the new global challenges that Mexico will face: agro-food oligopolies, economic inequalities, cybersecurity, technological dependence, high investment, widespread unemployment, environmental degradation, climate change, and sustainable food production for a growing population. Public policies adapted to each region and type of producer are required to guarantee food sovereignty, continuous training, new jobs, technological adoption, agroecological restoration, conservation of native crops, and traditional agricultural methods for a sustainable future.

Keywords: Superintelligent Agricultural Revolution, Sustainable Future, Agriculture 5.0, Advanced Artificial Intelligence, Global Challenges.

¹ PhD Thesis in Agricultural Economics, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Javier Medina Hernández.
Advisor: Dr. Ignacio Caamal Cauich.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

La humanidad está en el inicio de la primera Revolución Artificial Superinteligente o “Sociedad 5.0” que transformará todo el sistema socioeconómico del mundo. En el caso del Sector Agropecuario global, surge una nueva Revolución Agrícola Superinteligente, denominada “Agricultura 5.0”, que redefinirá la forma en la que se producen, distribuyen y consumen alimentos. La Agricultura 5.0 automatizará la toma de decisiones con el Big Data Hiperconectado, análisis interdisciplinario, integración de diversas tecnologías avanzadas y una mínima intervención humana. Si bien, modificará las prácticas agrícolas de los grandes productores, haciéndolas más eficientes, efectivas y personalizadas, también las prácticas tradicionales de pequeños y medianos productores sufrirán modificaciones significativas, debido a estos cambios en el futuro (Ahmad & Nabi, 2021; Bissadu et al., 2024; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; Symeonaki et al., 2024).

A diferencia de las revoluciones agrícolas anteriores, como la Agricultura 3.0 (Revolución Verde) y la Agricultura 4.0 (Agricultura de Precisión), centradas en aumentar la productividad mediante mecanización, insumos químicos, técnicas de riego, mejoramiento genético, recolección de datos y automatización parcial (Cerutti, 2019; Liu et al., 2021), la Agricultura 5.0 se enfoca en abordar los desafíos actuales que enfrentan los subsectores agrícola, ganadero y forestal globales, incluyendo el agotamiento de los recursos, el crecimiento demográfico, la desigualdad socioeconómica y el cambio climático, promoviendo sistemas más precisos, adaptables y sostenibles (Ahmad & Nabi, 2021; Bissadu et al., 2024).

A medida que avanzamos hacia el año 2050 y que la población mundial supere los 9.7 mil millones (ONU, 2023), la demanda de alimentos aumentará considerablemente, ejerciendo una presión nunca vista sobre los sistemas agrícolas de todo el mundo. Lo que subraya la magnitud de la tarea que se avecina. Sin embargo, el desafío debe centrarse en producir más alimentos nutritivos y que estén al alcance de todos (FAO et al., 2024).

En el presente, a pesar de que se producen suficientes alimentos para alimentar a toda la población mundial, millones de personas sufren de hambre y cerca de 2.3 mil millones se encuentran en situación de inseguridad alimentaria moderada o grave. África, Asia, América Latina y el Caribe y Oceanía son las regiones que presentan un elevado porcentaje de habitantes subalimentados, en orden de importancia. Problemática mundial que va en aumento por el desperdicio de alimentos, la desigualdad social extrema, el desempleo y la recesión económica en la que entraron países de bajos ingresos, debido a la pandemia del coronavirus o COVID-19 (FAO et al., 2024; Tosoni & García, 2022).

Lo anterior ha posicionado al Sector Agropecuario como indispensable para un desarrollo económico a largo plazo, en todos los niveles: regional, nacional y mundial. Por lo tanto, se requiere de información confiable del panorama integral a futuro del ámbito agropecuario, concentrando la atención en el uso sostenible de los recursos naturales y en asegurar una adecuada nutrición de una población en crecimiento y con ello, mejorar la soberanía alimentaria de los países en desarrollo (FAO et al., 2024; OECD & FAO, 2024).

En México, se destina el 44.8% de su superficie (87.9 millones de hectáreas, Mha) a la agrícola (29.8 Mha) y ganadería (58.1 Mha). Además, 27 millones de mexicanos dependen de estas actividades (INEGI, 2023). El Sector Agropecuario de México ha estado en constante transformación, provocada por el crecimiento poblacional y las políticas agrarias, sociales y económicas. Este dinamismo ha sido evidente en los últimos años, donde la pandemia del COVID-19 impulsó un aumento en la producción y exportación de frutas, verduras y carne. Estados Unidos se consolidó como el principal mercado receptor de estos productos; además, es el mayor productor y exportador de maíz a México. Tendencia que intensificó la pérdida de autosuficiencia alimentaria, la pobreza y la dependencia de importaciones (Cerutti, 2019; Espinosa Cortés, 2022; Gutiérrez Núñez, 2020).

Los pequeños productores, que constituyen la mayoría de la fuerza laboral agrícola de México, han sido vulnerables a las fluctuaciones del mercado y las políticas gubernamentales, principalmente los de pueblos originarios. No

obstante, son las Organizaciones Campesinas e Indígenas las promotoras de la soberanía alimentaria, para reducir la dependencia alimentaria, destacando la necesidad de una gobernanza efectiva de los cultivos nativos, biodiversidad y recursos naturales, así como la recuperación de la cultura. Para el desarrollo del Sector Agropecuario en México es vital reconocer a los campesinos como actores sociales clave. La integración de la Agricultura 5.0, mientras se preservan las prácticas tradicionales con una gobernanza eficiente, será un reto monumental (OECD & FAO, 2024; Pérez-Hernández et al., 2024; Rivera-Núñez, 2024).

En la búsqueda de un sistema alimentario más saludable, equitativo y sostenible hacia 2050, con la implementación de la Agricultura 5.0 en el Sector Agropecuario mexicano y la rápida adopción tecnológica por parte de potencias mundiales provocará una revolución con oportunidades y nuevos retos futuros. En particular, destacan la falta de infraestructura, dependencia tecnológica, vulnerabilidad de los sistemas digitales, ciberseguridad, falta de productores calificados, reducción de trabajos rutinarios, migraciones, renovación continua de los planes de estudio en las instituciones de educación, ajuste constante de las políticas públicas y otros aún no identificados (Buka et al., 2022; Espinosa Cortés, 2022; FAO, 2022; Martos et al., 2021).

Las propuestas para enfrentar los desafíos futuros anteriores requieren de un análisis integral, a largo plazo, de las perspectivas agrícolas en México. El estudio holístico apoyado con la teoría de series de tiempo y los pronósticos al 2050 son útiles para orientar la toma de decisiones en el presente (Aladag, 2017; Masini et al., 2021; Mills, 2019). Las Redes Neuronales Recurrentes (RNR), especialmente las variantes LSTM profundas, se encuentran entre los métodos más utilizados en series de tiempo, debido a su capacidad para proporcionar pronósticos precisos en la resolución de problemas complejos, ya sean series de tiempo lineales o no lineales. Para ello, en estos modelos se indica el supuesto de *ceteris paribus*, la incertidumbre en los datos y el principio de parsimonia (Abbasimehr et al., 2020; Makridakis et al., 2022; Masini et al., 2021).

En este contexto global complejo, el objetivo general fue analizar las perspectivas económicas del Sector Agropecuario de México hasta el año 2050, con series de tiempo y redes neuronales profundas (RNP), para presentar un panorama general del futuro agrícola, que ayude en la toma de decisiones ante los desafíos presentes y futuros.

1.1 Planteamiento del problema

El panorama global del Sector Agropecuario está experimentando una profunda transformación por efecto de la Agricultura 5.0. Esta nueva Revolución Agrícola Superinteligente será incentivada por la convergencia de factores que incluyen avances tecnológicos, cambio climático, crecimiento de la población y modelos económicos en evolución. Estos factores globales están reconfigurando el Sector Agropecuario de maneras que exigen el desarrollo de estrategias innovadoras para garantizar la sostenibilidad y la resiliencia. Por lo anterior, el Sector Agropecuario de México se encuentra en un punto de inflexión, donde su trayectoria futura estará determinada por dinámicas tanto globales como nacionales (Ahmad & Nabi, 2021; Bissadu et al., 2024; FAO, 2023; Fountas et al., 2024; Symeonaki et al., 2024).

Los siguientes desafíos nacionales limitan el crecimiento de todo el Sector y lo seguirán haciendo en el largo plazo: pobreza, rezagos tecnológicos, altos costos de los insumos, acceso limitado a créditos, programas de estudio obsoletos, migraciones, degradación ambiental, sequía, polarización en los sistemas de producción y una mayor competencia de los sistemas agrícolas subsidiados y tecnológicamente más avanzados, como los de Estados Unidos y Canadá (CONEVAL, 2023; Espinosa Cortés, 2022; FAO et al., 2024; Osorio-García et al., 2015; Rivera-Núñez, 2024). Por ende, es necesario de un análisis integral de estos factores y sus implicaciones a futuro para responder a la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál será el panorama que existirá en el Sector Agropecuario de México hasta el año 2050?

1.2 Justificación

La necesidad de realizar un análisis integral de las perspectivas del Sector Agropecuario de México se basa en la importancia que tendrá la Agricultura 5.0 en la economía y la sociedad. Además, se reconoce el impacto de la información a largo plazo, para analizar lo que sucederá hacia el año 2050 y, de esta manera, superar los altibajos característicos de los ciclos económicos del corto y mediano plazo. Los pronósticos al 2050 de variables clave que describen el panorama de la producción, la superficie sembrada, la superficie cosechada, los rendimientos y el consumo de los principales productos agrícolas del mundo y de México serán relevantes para apoyar en la toma de decisiones y la creación de un marco de nuevas políticas públicas estratégicas, que mejoren la situación de los tipos de productores, conserven las prácticas tradicionales y restauren los recursos naturales en el presente, con el fin de orientar el desarrollo económico del Sector Agropecuario mexicano hacia un futuro sostenible (Ahmad & Nabi, 2021; FAO, 2023; FAO et al., 2024; Fountas et al., 2024).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar las perspectivas económicas del Sector Agropecuario de México hasta el año 2050, con series de tiempo, RNP del tipo LSTM y un estudio interdisciplinario, para ofrecer una comprensión holística de los factores que darán forma a la economía agrícola de México ante los desafíos futuros.

1.3.2 Objetivos particulares

- Identificar los cultivos dominantes del Sector Agropecuario mundial hacia el año 2050, utilizando análisis de datos y redes neuronales artificiales, para pronosticar la influencia económica y los desafíos futuros de los principales cultivos a nivel global y en México.

- Analizar la producción y el consumo de maíz grano en México, con series de tiempo y redes neuronales recurrentes, para describir la situación presente y futura del cultivo de maíz.

1.4 Hipótesis

Los cultivos que dominan la producción en el mundo son pocos, considerando la cantidad de productos agrícolas que existen actualmente. Se estima que, para el año 2050, la población continuará aumentando, lo que provocará una demanda mayor de alimentos y la producción agropecuaria aumentará gracias al aumento en la productividad generada por la innovación tecnológica de la Agricultura 5.0. Se prevé que los cultivos dominantes, en especial el maíz en México, se verán afectados por diferentes desafíos futuros, como el crecimiento demográfico, conflictos, pobreza, polarización de la producción, falta de créditos, degradación de los recursos naturales, cambio climático y dependencia tecnológica.

1.5 Estructura del documento

Este Documento de Grado está estructurado en siete capítulos, cada uno de los cuales explora un aspecto fundamental del futuro del Sector Agropecuario de México en la era de la Inteligencia Artificial General (AGI) y la Agricultura 5.0, considerando también los desafíos económicos globales. En las siguientes páginas se analiza cómo la AGI puede transformar la agricultura, mejorando la eficiencia y la productividad mediante la automatización y la optimización de los diversos recursos. También se analizan los impactos potenciales de estos avances tecnológicos en el Sector Agropecuario mexicano, proporcionando una comprensión detallada de las oportunidades y retos que se presentan.

Además, se contrastan los efectos que traerán las tecnologías de vanguardia entre los pequeños, medianos y grandes productores, asegurando que la adopción tecnológica beneficie de manera equitativa a todos los actores clave del campo mexicano. De igual manera, se examina la importancia de la conservación de los recursos naturales, promoviendo prácticas agrícolas tradicionales y

sostenibles. Cada capítulo ofrece un análisis riguroso respaldado por evidencia empírica y estudios de caso en artículos científicos, asegurando un enfoque científico integral e interdisciplinario.

En el **Capítulo 1**, titulado "Introducción General", se sientan las bases del estudio. Se presenta el planteamiento del problema, la justificación del estudio, los objetivos e hipótesis. Este capítulo ofrece un panorama completo de las motivaciones y metas del trabajo, preparando al lector para un viaje científico profundo y estructurado hacia el conocimiento avanzado de las revoluciones agrícolas.

El **Capítulo 2** revisa exhaustivamente la literatura existente, proporcionando un contexto detallado de las Perspectivas Económicas del Sector Agropecuario y los desafíos mundiales. Se explora la evolución histórica de la agricultura desde sus inicios hasta la actual Agricultura 5.0. Este recorrido histórico permite al lector comprender cómo hemos llegado a este punto crítico y por qué es fundamental seguir innovando en este campo, para planear un futuro prometedor.

El **Capítulo 3** se centra en "El Futuro de la Alimentación Mundial", identificando los cultivos dominantes en la Agricultura 5.0. A través de una combinación de materiales y métodos, resultados y discusiones, este capítulo revela visiones cruciales sobre cómo la tecnología avanzada está transformando la producción alimentaria global, destacando las tendencias y desarrollos que moldearán nuestro futuro.

En el **Capítulo 4**, se abordan los "Retos Actuales y Pronósticos en la Producción y Consumo de Maíz Grano en México". Este capítulo incluye un análisis detallado de datos, métodos avanzados como las Redes Neuronales Recurrentes y una discusión profunda sobre las perspectivas de producción y consumo de maíz grano, tanto a nivel mundial como en México. Aquí, el lector encontrará un estudio riguroso que combina análisis técnico con implicaciones prácticas hacia el 2050.

El **Capítulo 5** ofrece las "Conclusiones Generales" basadas en los hallazgos del estudio. Este capítulo sintetiza las principales conclusiones, proporcionando una visión integradora que resalta las implicaciones de los resultados obtenidos a largo plazo. Es una lectura esencial para quienes buscan entender las conclusiones clave y su relevancia en el Sector Agropecuario de México.

En el **Capítulo 6**, se presentan "Recomendaciones" derivadas de las conclusiones generales. Este capítulo sugiere acciones prácticas basadas en la investigación y ofrece directrices claras para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la Agricultura 5.0. Las recomendaciones están diseñadas para ser aplicables y relevantes, facilitando la implementación de mejoras concretas.

Finalmente, el **Capítulo 7** incluye los "Anexos", que detallan las publicaciones y la de difusión científica. Este capítulo proporciona un contexto adicional sobre las actividades realizadas durante mis estudios en el Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola, las cuales enriquecieron significativamente los temas tratados en esta investigación. La presentación de los resultados ante expertos del área permitió validar y fortalecer los hallazgos obtenidos, aportando un valor añadido a los análisis y conclusiones expuestas en este Documento de Grado.

*¿Qué esperas del futuro?
Y en especial...
¿Cómo te imaginas vivir en el año 2050?*

Javier Medina Hernández, 2024.

1.6 Literatura citada

- Abbasimehr, H., Shabani, M., & Yousefi, M. (2020). An optimized model using LSTM network for demand forecasting. *Computers and Industrial Engineering*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106435>
- Ahmad, L., & Nabi, F. (2021). *Agriculture 5.0: Artificial Intelligence, IoT and Machine Learning*. CRC Press.
- Aladag, C. H. (2017). *Advances in time series forecasting* (Vol. 2). Bentham Science Publishers. <https://doi.org/10.2174/97816810852891170201>
- Bissadu, K. D., Sonko, S., & Hossain, G. (2024). Society 5.0 enabled agriculture: Drivers, enabling technologies, architectures, opportunities, and challenges. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2024.04.003>
- Buka, S., Tkachuk, V., Kondratiuk, V., Tonkha, O., & Slobodyanyuk, N. (2022). Prospects for agribusiness in Ukraine over the next 5 years. *International Journal of Environmental Studies*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2157630>
- Cerutti, M. (2019). Trigo y revolución verde en el noroeste de México (1930-1970). *Mundo Agrario*, 20(43), e103–e103. <https://doi.org/10.24215/15155994E103>
- CONEVAL. (2023). *Medición de la pobreza 2022*. www.coneval.org.mx/
- Espinosa Cortés, L. M. (2022). Hegemonía de Estados Unidos en el orden agroalimentario mundial y la pérdida de la autosuficiencia alimentaria de México. *CIENCIA Ergo-Sum*, 29(1). <https://doi.org/10.30878/ces.v29n1a4>
- FAO. (2022). The Future of food and agriculture - Drivers and triggers for transformation. In *The Future of Food and Agriculture*, no. 3. FAO Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cc0959en>
- FAO. (2023). *El futuro de la alimentación y la agricultura: factores y desencadenantes de la transformación*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/cc1024es>
- FAO, IFAD, WHO, WFP, & UNICEF. (2024). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2024*. <https://doi.org/10.4060/cd1254es>
- Fountas, S., Espejo-Garcia, B., Kasimati, A., Gemtou, M., Panoutsopoulos, H., & Anastasiou, E. (2024). Agriculture 5.0: Cutting-Edge Technologies, Trends, and Challenges. *IT Professional*, 26(1), 40–47. <https://doi.org/10.1109/MITP.2024.3358972>

- Gutiérrez Núñez, N. L. (2020). Revolución verde en los suelos agrícolas de México. *Ciencia, políticas públicas y agricultura del maíz, 1943-1961. Mundo Agrario*, 21(47), e142–e142. <https://doi.org/10.24215/15155994E142>
- INEGI. (2023). *Resultados Definitivos del Censo Agropecuario 2022*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_De_f/CA_Def2022.pdf
- Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2021). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4322–4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
- Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. (2022). M5 accuracy competition: Results, findings, and conclusions. *International Journal of Forecasting*, 38(4), 1346–1364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.11.013>
- Martos, V., Ahmad, A., Cartujo, P., & Ordoñez, J. (2021). Ensuring agricultural sustainability through remote sensing in the era of agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11(13), 5911. <https://doi.org/10.3390/app11135911>
- Masini, R. P., Medeiros, M. C., & Mendes, E. F. (2021). Machine learning advances for time series forecasting. *Journal of Economic Surveys*, 37(1), 76–111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/joes.12429>
- Mills, T. C. (2019). *Applied time series analysis: A practical guide to modeling and forecasting* (Elsevier, Ed.; 1st ed.). Academic press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03956-6>
- OECD, & FAO. (2024). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033* (OECD-FAO Agricultural Outlook). OECD. <https://doi.org/10.1787/4c5d2cfb-en>
- ONU. (2023). *World Population Prospects 2022*. <https://population.un.org/wpp/>
- Osorio-García, N., López-Sánchez, H., Ramírez-Valverde, B., Gil-Muñoz, A., & Gutiérrez-Rangel, N. (2015). Producción de maíz y pluriactividad de los campesinos en el Valle de Puebla, México. *Nova Scientia*, 7(14), 577–600. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052015000200577
- Pérez-Hernández, C., Hernández, L. L., García, A. G., & Rangel, M. I. P. (2024). La gobernanza en la gestión comunitaria del agua en Zinacantán, Chiapas, México. *Sociedad y Ambiente*, 27, 1–28. <https://doi.org/10.31840/SYA.V2024I27.2880>

- Rivera-Núñez, T. (2024). ¿Post conservación de territorios indígenas y campesinos en América Latina? *Journal of Political Ecology*, 31(1), 137–162. <https://doi.org/10.2458/JPE.5287>
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 207, 10(2), 207. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10020207>
- Symeonaki, E., Maraveas, C., & Arvanitis, K. G. (2024). Recent Advances in Digital Twins for Agriculture 5.0: Applications and Open Issues in Livestock Production Systems. *Applied Sciences*, 14(2), 686. <https://doi.org/10.3390/app14020686>
- Tosoni, G. A., & García, C. C. (2022). Elevada desigualdad, pandemias, cambio tecnológico y desempleo: una reseña en tiempos del covid-19. *EconomíaUNAM*, 19(55), 143–173. <http://revistaeconomia.unam.mx/index.php/ecu/article/view/699/665>

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Perspectivas económicas y desafíos mundiales

La agricultura, pilar de la civilización humana, ha estado intrínsecamente vinculada al desarrollo de sociedades, economías y culturas a nivel mundial. Desde los primeros días de las comunidades agrícolas sedentarias hasta los complejos sistemas industrializados de producción de alimentos que prevalecen hoy en día, la agricultura ha evolucionado constantemente, adaptándose a las cambiantes condiciones ambientales, tecnológicas y sociales. A medida que la humanidad avanza en el siglo XXI, la agricultura global se enfrenta a nuevos desafíos y oportunidades sin precedentes (Bissadu et al., 2024; Fountas et al., 2024; Symeonaki et al., 2024).

En muchas regiones, la lucha por sobrevivir obliga a las personas a agotar recursos vitales, como la educación y la salud, o a liquidar sus activos productivos, comprometiendo su futuro. La implementación de acciones inmediatas es esencial para combatir la malnutrición y la inseguridad alimentaria (FAO, 2022; FAO et al., 2024). De lo contrario, estas problemáticas se agravarán significativamente para el año 2050, con una población mundial proyectada en 10 mil millones. Asimismo, se prevé un aumento del 70% en la demanda de alimentos, anticipando un futuro aún más crítico con profundas repercusiones sociales, económicas y ambientales (FAO, 2009, 2018; ONU, 2023).

No obstante, este crecimiento en la demanda de alimentos ocurre en un momento en que la capacidad del planeta para producir alimentos está bajo una presión significativa, debido a una combinación de factores interrelacionados: el cambio climático, la sobreexplotación de los recursos naturales, la degradación de las tierras cultivables y la reducción de los rendimientos derivados de prácticas convencionales (FAO, 2023, 2024). Además, se estima que el uso de tierras agrícolas aumente entre un 10% y un 20% hacia el año 2050, en respuesta a la creciente demanda alimentaria global. El aumento en la superficie cultivable y la reducción de las áreas forestales resultarán en prácticas insostenibles, mayores

costos de producción debido a tierras de menor calidad y la necesidad de más infraestructura (Bissadu et al., 2024; FAO, 2018, 2024; FAO et al., 2024).

Ante este panorama, la intensificación sostenible de la agricultura, apoyada en tecnologías avanzadas propias de la Agricultura 5.0, emerge como una solución clave. Esta estrategia busca frenar la expansión desmedida de la superficie agrícola, optimizar el uso de los suelos fértiles del planeta, asegurando su calidad y productividad a largo plazo. El surgimiento de la Agricultura 5.0 constituye una evolución en las técnicas agrícolas convencionales, tradicionales y una necesaria Revolución Agrícola Superinteligente que promueva un cambio total de paradigma a nivel mundial (Bissadu et al., 2024; Haloui et al., 2024).

Este enfoque futurista integra nuevas tecnologías avanzadas, innovaciones interdisciplinarias y prácticas sostenibles para enfrentar la inminente crisis alimentaria global. La Agricultura 5.0 no es un avance tecnológico aislado, representa la convergencia de la Agronomía, Economía, Silvicultura, Biología, Biotecnología, Ecología, Sociología, Ciencia de Datos, Robótica 2.0 (Cobots), Inteligencia Artificial Avanzada, Computación Cuántica, Internet de las Cosas, Gemelos Digitales, Ética Ambiental y otras ciencias aún en desarrollo, creando un nuevo escenario agrícola que ayudará a sustentar la civilización humana ante los desafíos futuros, sin depender de la actividad directa del hombre (Ahmad & Nabi, 2021; Bissadu et al., 2024; Fountas et al., 2024; Jha et al., 2021; Symeonaki et al., 2024).

Es crucial reconocer, también, la capacidad de los sistemas alimentarios y la gestión territorial de los pueblos indígenas como elementos clave para la sostenibilidad y la resiliencia del futuro agrícola. Sus métodos de gobernanza y gestión territorial han permitido lograr autosuficiencia alimentaria, usar sus recursos de manera eficiente, producir en temporal y en condiciones extremas durante miles de años. Estos pueblos han sido de los más afectados por los cambios globales en la agricultura y continuarán siendo cruciales para mejorar la seguridad alimentaria global, siempre y cuando sus prácticas agrícolas

tradicionales, conocimientos y cultura ancestrales no se extingan ni modifiquen drásticamente (FAO, 2022; López-Torres et al., 2016; Rivera-Núñez, 2024).

2.1.1 Evolución de la Agricultura en el mundo: Las cinco revoluciones históricas

Desde el origen de la civilización humana, la agricultura ha sido fundamental para el crecimiento y el desarrollo de las sociedades (Chu & Xu, 2024; Furholt, 2021; Larsen et al., 2019). Sin embargo, la convergencia de tecnologías y nuevos conocimientos ha marcado el inicio de una nueva era en la que esta actividad ancestral se transforma de maneras inimaginables (Ahmad & Nabi, 2021; Symeonaki et al., 2024). Cada una de las cuatro Revoluciones Agrícolas han tenido su propio ritmo, duración e interpretación, determinadas en gran medida por las capacidades cognitivas y tecnológicas de las sociedades de cada época (Figura 1). Hoy, estamos al comienzo de la quinta gran revolución que promete cambiarlo todo: La Revolución Agrícola Superinteligente o “Agricultura 5.0” (Bissadu et al., 2024; Haloui et al., 2024; Symeonaki et al., 2024).

Marcada por la integración de Inteligencia Artificial (IA), Robótica 2.0, Biotecnología y otras disciplinas de vanguardia, esta nueva era de la agricultura optimizará la producción, distribución y consumo de todos y cada uno de los tipos de alimentos: origen animal y vegetal. Para comprender plenamente las implicaciones de la Agricultura 5.0 en el Sector Agropecuario global, es crucial analizar la trayectoria histórica de las Revoluciones Agrícolas anteriores (Bissadu et al., 2024; Fountas et al., 2024; Jha et al., 2021; Liu et al., 2021; Symeonaki et al., 2024).

Cada revolución ha contribuido con innovaciones tecnológicas y cambios metodológicos que, aunque significativos, han presentado transiciones sutiles y graduales. En muchos casos, las características de las revoluciones anteriores siguen siendo relevantes en el presente y continuarán influyendo en el futuro. No todo ha cambiado drásticamente; en cambio, hay una evolución constante donde las prácticas tradicionales coexisten con las innovaciones modernas, creando un

panorama agrícola complejo y dinámico. Este contexto histórico es vital para entender cómo la Agricultura 5.0 puede integrarse y transformar las prácticas agrícolas actuales (Taj & Jhanjhi, 2022; Zambon et al., 2019).

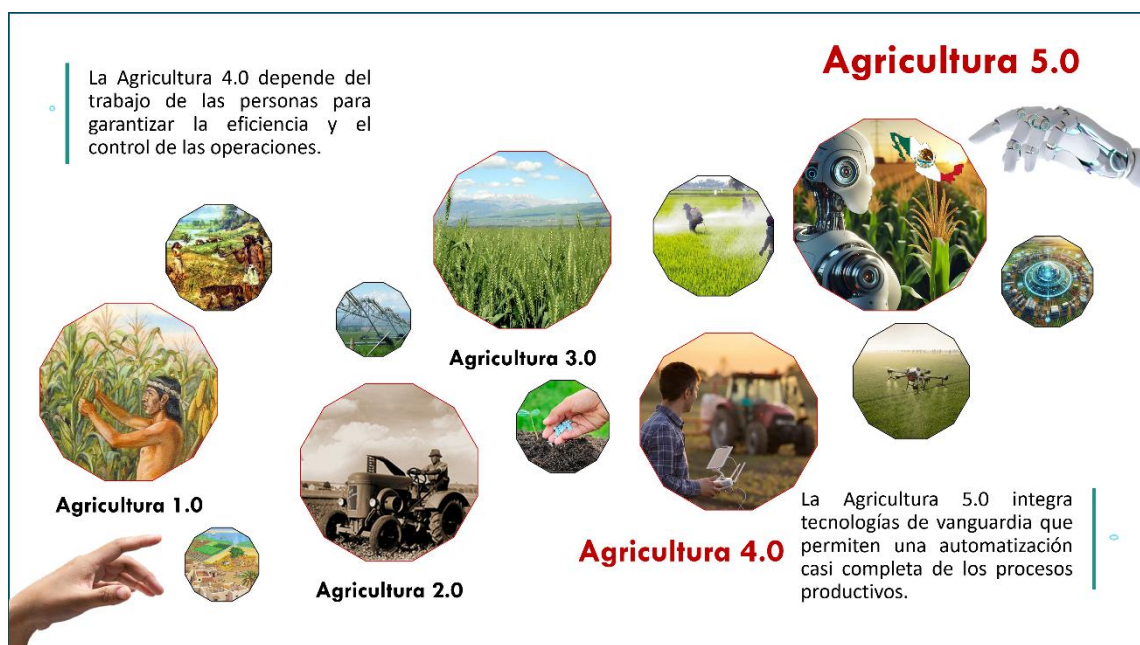


Figura 2-1. Los tipos de Agricultura y las diferencias clave entre la Agricultura 4.0 y la Agricultura 5.0.

Fuente: Con información de K. D. Bissadu et al., 2024; Symeonaki et al., 2024; Taj & Jhanjhi, 2022.

2.1.2 Agricultura 1.0

La primera Revolución Agrícola, conocida como Revolución Neolítica, tuvo lugar hace aproximadamente 10,000 años, cuando los seres humanos pasaron de sociedades nómadas de cazadores-recolectores a comunidades agrícolas sedentarias. Este cambio trascendental permitió la producción de excedentes de alimentos, lo que llevó al surgimiento de ciudades, el comercio y estructuras sociales más complejas: estados e imperios. La agricultura se convirtió en la base de las economías y sociedades, permitiendo una mayor especialización del trabajo y el desarrollo de nuevas tecnologías y herramientas (Chu & Xu, 2024; Furholt, 2021; Larsen et al., 2019; Paul, 2023; Shavit & Sharon, 2023).

La agricultura tradicional, intrínsecamente ligada al entorno natural, representaba la relación íntima de la humanidad con la tierra, las estaciones y los ciclos naturales. Las primeras prácticas agrícolas se centraron en la subsistencia, cuyo objetivo era producir alimentos suficientes para satisfacer las necesidades inmediatas de familias o comunidades. Esta primera Revolución Agrícola requirió un arduo trabajo y un conocimiento exhaustivo de los ecosistemas locales, patrones climáticos y condiciones del suelo. Los agricultores se valían de herramientas rudimentarias como arados de madera, azadas y hoces, a menudo fabricadas a mano o por herreros locales (Larsen et al., 2019; Prathapachandran & Devadas, 2023; Smyth & Gillis, 2022).

Estas herramientas, aunque simples, resultaban efectivas en operaciones agrícolas a pequeña escala, donde la principal fuente de energía era la fuerza muscular humana y, en algunos casos, la fuerza animal. A lo largo de los milenios, la agricultura continuó evolucionando con hitos clave como la rotación de cultivos, que ayudó a mantener la fertilidad del suelo y a reducir la incidencia de plagas y enfermedades (Ewing et al., 2024; J. Zhang et al., 2024). La mejora genética a través de la cría selectiva, por miles de años, permitió a los agricultores desarrollar variedades de plantas y razas de animales con características deseadas, como mayor rendimiento, resistencia a enfermedades y adaptabilidad a diferentes climas y suelos (Whitlam et al., 2024).

El uso de animales en la agricultura tradicional fue un avance significativo que permitió prácticas agrícolas más eficientes. Los bueyes, caballos y burros se usaban comúnmente para tirar de arados, transportar mercancías y realizar otras tareas pesadas que estaban más allá de la capacidad de la fuerza humana por sí sola. La domesticación de animales también proporcionó una fuente de alimento y materiales como lana y cuero, logrando diversificar aún más las economías agrícolas (Chu & Xu, 2024; Yacobaccio & Vilá, 2013).

La introducción de sistemas de riego y otras técnicas de manejo del agua permitió la expansión de la agricultura a regiones más áridas, aumentando la capacidad de producción (Chu & Xu, 2024; Whitlam et al., 2024). La aparición de tecnologías

como el arado de hierro mejoró la eficiencia de la labor agrícola, reduciendo el esfuerzo físico necesario y aumentando la productividad (de Agüero et al., 2022). Estos avances de la Revolución Neolítica marcaron el comienzo de una serie de transformaciones que han moldeado la historia de la humanidad, estableciendo las bases para el desarrollo de las civilizaciones, el progreso y las innovaciones agrícolas posteriores, como la mecanización, que continuaron transformando el paisaje agrícola (Chu & Xu, 2024; Fountas et al., 2024; Paul, 2023).

2.1.3 Agricultura 2.0

La mecanización de la agricultura, una transformación profunda en la historia del trabajo humano y la producción de alimentos marcó el comienzo de la segunda Revolución Agrícola, una nueva era en la relación entre los seres humanos y la tierra. La Agricultura 2.0 comenzó a fines del siglo XVIII y continuó durante los siglos XIX y XX, fue impulsada por las innovaciones de la Primera y Segunda Revolución Industrial. Con la introducción de las máquinas de vapor, la maquinaria impulsada por agua y, más tarde, la electricidad y las técnicas de producción en masa, el sector agrícola experimentó un cambio radical (Ahmad & Nabi, 2021; Haloui et al., 2024; Symeonaki et al., 2024).

Lo que alguna vez había sido un sistema que dependía del trabajo humano y animal, ahora estaba cada vez más dominado por máquinas, impulsadas por fuentes de energía externas. La introducción de herramientas mecanizadas comenzó a alterar esta realidad, cambiando fundamentalmente la naturaleza del trabajo agrícola y la estructura de las economías rurales. La Primera Revolución Industrial, que comenzó alrededor de 1760 y continuó hasta aproximadamente 1840, se caracterizó por la adopción generalizada de la energía de vapor y la maquinaria impulsada por agua. En la agricultura, esto significó la introducción de trilladoras, arados y otros equipos impulsados por vapor que aumentaron la eficiencia de las operaciones agrícolas (Emmanuel et al., 2023; Haloui et al., 2024; Rakhra et al., 2022; Symeonaki et al., 2024).

Sin embargo, el impacto total de la mecanización en la agricultura no se apreciaría hasta la Segunda Revolución Industrial, que se desarrolló desde fines del siglo XIX hasta principios del siglo XX, cuando la electricidad y las técnicas de producción en masa revolucionaron la fabricación de maquinaria agrícola. Este avance fue particularmente significativo en áreas con suelos pesados y ricos en arcilla, donde el trabajo humano y animal había luchado anteriormente para abrirse paso a través de la tierra densa. Con la introducción de esta maquinaria, los agricultores pudieron cultivar áreas de tierra más grandes de manera más eficiente, lo que llevó a un aumento de la producción agrícola (Bissadu et al., 2024; Emmanuel et al., 2023; Zhang et al., 2024).

La Segunda Revolución Industrial, que comenzó a fines del siglo XIX, trajo consigo una nueva ola de innovaciones tecnológicas que transformarían aún más la agricultura. Uno de los avances más importantes durante este período fue la adopción generalizada de la electricidad. A diferencia de la energía a vapor, que requería motores grandes y engorrosos, la electricidad podía transmitirse a largas distancias y usarse para impulsar una amplia variedad de máquinas y herramientas. En la agricultura, esto significó la introducción de bombas eléctricas para riego, motores eléctricos para molinos de granos y, finalmente, tractores y otras máquinas agrícolas accionadas eléctricamente (Bissadu et al., 2024; McNeal, 2022; Zhang et al., 2024).

El tractor, en particular, se convirtió en un símbolo de la mecanización de la agricultura durante el siglo XX. Los primeros tractores a gasolina se desarrollaron a finales del siglo XIX, pero no fue hasta principios del siglo XX cuando se hicieron ampliamente disponibles y asequibles. Los tractores revolucionaron la agricultura al proporcionar una fuente de energía versátil y potente que podía utilizarse para una amplia gama de tareas, desde arar y plantar hasta cosechar y transportar cultivos. A diferencia de las máquinas de vapor, que eran grandes y estacionarias, los tractores eran móviles y podían utilizarse en granjas de todos los tamaños. Esta movilidad, combinada con la creciente disponibilidad de gasolina asequible, convirtió a los tractores en una herramienta esencial para los

agricultores modernos (Bissadu et al., 2024; Esperante Paramos, 2023; Tsench et al., 2023).

El impacto de los tractores en la productividad agrícola no se puede subestimar. Al reemplazar el trabajo humano y animal con energía mecánica, los tractores permitieron a los agricultores cultivar áreas más grandes de tierra con menos esfuerzo. Este aumento de la eficiencia condujo a mayores rendimientos de los cultivos y, a su vez, contribuyó al crecimiento del suministro mundial de alimentos. La rápida adopción de equipos agrícolas mecanizados fue un factor clave en el auge agrícola que se produjo a mediados del siglo XX, ya que los agricultores pudieron producir más alimentos con menos trabajadores. Lo que generó importantes consecuencias sociales y ambientales (Esperante Paramos, 2023; McNeal, 2022; Tsench et al., 2023; Zhang et al., 2024).

A medida que las máquinas comenzaron a reemplazar el trabajo humano y animal, muchos trabajadores rurales se encontraron sin trabajo. En países como los Estados Unidos y el Reino Unido, la mecanización de la agricultura contribuyó a una migración masiva de personas de las zonas rurales a las ciudades, donde buscaron empleo en fábricas y otras industrias. Este cambio de la vida rural a la urbana fue una característica definitoria de la Revolución Industrial y tuvo profundas implicaciones para la estructura de la sociedad. Sin embargo, en muchos países en desarrollo, la transición a la agricultura mecanizada fue más lenta y los métodos agrícolas tradicionales siguieron dominando hasta bien entrado el siglo XX (Azzulin et al., 2022; Esperante Paramos, 2023; McNeal, 2022).

Además de su impacto social, la mecanización de la agricultura también tuvo importantes consecuencias ambientales. El uso generalizado de tractores y otras máquinas condujo a la intensificación de las prácticas agrícolas, ya que los agricultores buscaban maximizar la productividad de sus tierras (Azzulin et al., 2022; Esperante Paramos, 2023). Esta intensificación a menudo implicó el uso de fertilizantes químicos y pesticidas, que se desarrollaron a principios del siglo XX como una forma de aumentar el rendimiento de los cultivos y controlar las

plagas. Si bien estos productos agroquímicos contribuyeron al crecimiento del suministro mundial de alimentos, también tuvieron efectos negativos sobre el medio ambiente, incluida la degradación del suelo, la contaminación del agua y la pérdida de biodiversidad (Gutiérrez Núñez, 2020; Osumanu & Kosoe, 2023).

A pesar de estos desafíos, la mecanización de la agricultura ha tenido un profundo impacto en el sistema alimentario mundial. Al aumentar la eficiencia de las operaciones agrícolas, la agricultura mejoró la productividad y aumentó la producción de los cultivos con menos recursos, contribuyendo al crecimiento de la población mundial y al desarrollo de las economías modernas. Sin embargo, no se pueden ignorar los costos ambientales y sociales de la agricultura mecanizada. Al mirar hacia el futuro, está claro que se necesitarán nuevos enfoques de la agricultura para abordar estos desafíos (Azzulin et al., 2022; McNeal, 2022; Tsench et al., 2023; Zhang et al., 2024).

2.1.4 Agricultura 3.0

La mecanización de la agricultura transformó la agricultura de una actividad que requería mucha mano de obra a un proceso más eficiente impulsado por máquinas. Sin embargo, la siguiente Revolución Agrícola, que comenzó a tomar forma en la segunda mitad del siglo XX, iría más allá de la mera mecanización. Esta nueva era, impulsada por el rápido desarrollo de variedades mejoradas, fertilizantes químicos, pesticidas y el inicio de las primeras computadoras y la automatización marcaron los inicios de lo que ahora conocemos como “Revolución Verde” o Agricultura 3.0 (Cerutti, 2019; Gutiérrez Núñez, 2020; Zhang et al., 2024).

La industrialización acelerada y la expansión urbana generaron una demanda sin precedentes de alimentos, forzando a los agricultores a maximizar la producción con recursos limitados. Este desafío llevó al auge del uso de productos agroquímicos. Los fertilizantes químicos, como el nitrato de amonio y el fosfato, fueron esenciales para reponer los nutrientes del suelo agotado, logrando así rendimientos de cultivos significativamente mayores (Bhatt et al., 2019; Carmo et

al., 2017; Iqbal et al., 2021). Al mismo tiempo, los pesticidas fueron cruciales para proteger los cultivos de plagas y enfermedades (Dwivedi et al., 2022; Khan et al., 2023).

Sin embargo, el excesivo empleo de estos productos desencadenó una serie de efectos colaterales adversos, incluyendo la contaminación de fuentes de agua y el surgimiento de plagas y enfermedades resistentes a los pesticidas. En muchos casos, el daño ambiental causado por el uso excesivo de agroquímicos superó los beneficios a corto plazo del incremento en la productividad agrícola. Esto ha llevado a un creciente reconocimiento de la necesidad de prácticas agrícolas más sostenibles y de la implementación de enfoques integrados para la gestión de plagas, enfermedades y la fertilización del suelo (Dwivedi et al., 2022; GCMA, 2022, 2024; Iqbal et al., 2021; Khan et al., 2023).

La mecanización de la agricultura, desarrollada en la Primera y la Segunda Revolución Industrial, también contribuyó al auge de monocultivos. A medida que los tractores y otras máquinas facilitaron el cultivo de grandes extensiones de tierra, muchos agricultores comenzaron a especializarse en la producción de un solo cultivo, como trigo, maíz o soja. Este cambio hacia el monocultivo también fue alentado por la creciente demanda de cultivos básicos en el mercado mundial y las políticas gubernamentales que subsidiaban la producción de ciertos productos básicos. Si bien la agricultura de monocultivo permitió mayores rendimientos, también hizo que los sistemas agrícolas fueran más vulnerables a plagas, enfermedades y cambios ambientales (Alain, 2017; Cerutti, 2019; Crews et al., 2018; Gutiérrez Núñez, 2020).

La dependencia de la agricultura de monocultivo y el uso generalizado de agroquímicos han suscitado inquietudes sobre la sostenibilidad a largo plazo de la Agricultura 3.0. En muchas partes del mundo, las prácticas agrícolas intensivas han provocado la degradación de la calidad del suelo, lo que dificulta a los agricultores mantener altos niveles de productividad a lo largo del tiempo. Además, el uso excesivo de agua para riego ha provocado el agotamiento de los

acuíferos y la desecación de ríos y lagos, en particular en las regiones áridas del mundo (Crews et al., 2018; Dwivedi et al., 2022; FAO, 2022).

De este modo, el inicio de la automatización en la agricultura fue parte de la Agricultura 3.0. Se caracterizó por una revolución tecnológica más amplia, donde destaca la invención de las computadoras y el desarrollo de lenguajes de programación, que se extendió por todas las industrias a mediados del siglo XX. Estas innovaciones sentaron las bases para una nueva era de automatización, eficiencia y control en las prácticas agrícolas. Antes de la llegada de las computadoras, las decisiones agrícolas se basaban en gran medida en la tradición, la intuición y la observación de los ciclos naturales (Bissadu et al., 2024; Haloui et al., 2024).

Si bien estos métodos habían servido a la humanidad durante milenios, fueron imprecisos y a menudo ineficientes, en particular a medida que crecía la población mundial y aumentaba la demanda de alimentos (Chu & Xu, 2024; FAO, 2022). La introducción de las computadoras en la agricultura prometió cambiar esta dinámica al permitir a los agricultores tomar decisiones basadas en datos sobre las condiciones del suelo, los patrones climáticos y la salud de los cultivos (Bissadu et al., 2024; Butu et al., 2023).

Una de las primeras aplicaciones de la tecnología informática en la agricultura fue el monitoreo del rendimiento, una técnica que permitía a los agricultores medir y registrar el rendimiento de sus cultivos en tiempo real. Los monitores de rendimiento, que comenzaron a aparecer en la década de 1980, generalmente se montaban en cosechadoras y otros equipos de cosecha. Estos dispositivos usaban sensores para medir la cantidad de grano u otros cultivos que se estaban cosechando, brindando a los agricultores datos detallados sobre el rendimiento de sus campos. Esta información luego podía analizarse para identificar patrones y tendencias, lo que ayudaba a los agricultores a optimizar sus estrategias de siembra y fertilización (Butu et al., 2023; Haloui et al., 2024).

Además del control del rendimiento, el desarrollo de sistemas de guía para tractores y otras maquinarias agrícolas representó otro hito temprano en la automatización de la agricultura. Estos sistemas, que inicialmente dependían de la tecnología GPS, permitieron a los agricultores guiar sus equipos con un alto grado de precisión, reduciendo la superposición y los espacios que a menudo se producían al plantar, fertilizar o cosechar cultivos. Con el tiempo, estos sistemas se volvieron más sofisticados, incorporando datos en tiempo real de sensores e imágenes satelitales para proporcionar a los agricultores un control aún mayor sobre sus campos (Butu et al., 2023; Haloui et al., 2024).

A pesar de estos primeros éxitos, la transición a la agricultura automatizada no estuvo exenta de desafíos. Uno de los principales problemas que surgieron durante este período fue la falta de resiliencia de estos primeros sistemas. Si bien las computadoras y las tecnologías de automatización ofrecieron mejoras significativas en eficiencia y precisión, también eran vulnerables a fallas, ciberataques y otras formas de interrupción. A medida que más aspectos de la agricultura se volvieron dependientes de los sistemas digitales, las posibles consecuencias de una falla del sistema se volvieron más graves. De manera similar, un ataque a la red informática podría interrumpir las operaciones agrícolas (Nikolaevich et al., 2024; Taj & Jhanjhi, 2022; Verma et al., 2023).

La cuestión de la ciberseguridad en la agricultura se volvió cada vez más importante a medida que las explotaciones agrícolas se conectaban y dependían más de las tecnologías digitales y el uso de datos. Los datos sobre las condiciones del suelo, el rendimiento de los cultivos y los patrones climáticos pueden ser valiosos no sólo para los agricultores, sino también para los competidores, los gobiernos y otras organizaciones. Además, el uso de sistemas basados en la nube para almacenar y analizar datos agrícolas introdujo nuevos riesgos, ya que estos sistemas a menudo eran vulnerables a los ciberataques (Nikolaevich et al., 2024; Verma et al., 2023).

Otro problema importante que surgió durante el desarrollo inicial de la agricultura automatizada fue la cuestión de la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas.

En particular, la dependencia de computadoras, sensores y otros dispositivos electrónicos creó nuevos desafíos en términos de uso de energía, desechos electrónicos y agotamiento de los recursos naturales. La producción y eliminación de dispositivos electrónicos y materiales utilizados en la agricultura, por ejemplo, contribuyó a la degradación ambiental (Rajesh Kumar K. V., 2024; Vastola et al., 2023), mientras que la energía necesaria para alimentar los sistemas automatizados aumentó la huella de carbono de las operaciones agrícolas (Guan et al., 2023; Lampridi et al., 2020).

Además, el enfoque en maximizar la productividad a través de la automatización a menudo condujo a la intensificación de las prácticas agrícolas, lo que podría resultar en la degradación del suelo, la contaminación del agua y otras formas de daño ambiental. A pesar de estos desafíos, el desarrollo temprano de la agricultura automatizada sentó las bases para muchas de las innovaciones que vendrían después (FAO, 2022; Fountas et al., 2024; Liu et al., 2021; Pérez-Hernández et al., 2024).

Las primeras etapas de la agricultura automatizada también destacaron la importancia de la educación y la capacitación para los agricultores. A medida que la agricultura se volvió más dependiente de la tecnología, los agricultores necesitaron aprender a usar programas informáticos, interpretar datos de sensores y solucionar problemas con la maquinaria. En muchos casos, esto representó un cambio significativo con respecto a las habilidades tradicionales asociadas con la agricultura, como el conocimiento de las condiciones del suelo, la rotación de cultivos y la cría de animales. Como resultado, el desarrollo temprano de la agricultura automatizada subrayó la necesidad de programas de educación y capacitación continuos para ayudar a los agricultores a adaptarse al cambiante panorama tecnológico (Marinoudi et al., 2024; Raji et al., 2024).

2.1.5 Agricultura 4.0

En la primera década del siglo XXI, el Sector Agrícola mundial comenzó a presenciar una profunda transformación, impulsada por el rápido avance de las

tecnologías digitales. Los inicios de la Agricultura 4.0, también conocida como “Agricultura Inteligente”, “Agricultura de Precisión” o “Agricultura Digital”, fomentada por las grandes potencias con innovaciones como la Inteligencia Artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés, Internet of Things), la computación en la nube (Cloud Computing) y el Big Data, marcaron una nueva era en la forma en que se producen, monitorean y distribuyen los alimentos. Este cambio, surgió a la par de la Cuarta Revolución Industrial (Liu et al., 2021; Orlova & Nikolaev, 2022; Zambon et al., 2019).

El concepto de agricultura de precisión se basa en la idea de utilizar tecnologías avanzadas para optimizar las prácticas agrícolas. En esencia, la Agricultura 4.0 busca aprovechar los datos de diversas fuentes (como sensores, drones, satélites, estaciones meteorológicas y otros dispositivos típicos del IoT) para brindar a los agricultores información en tiempo real sobre las condiciones de sus campos, cultivos, ganado y trabajadores. Luego, estos datos son procesados por algoritmos de IA, que analizan patrones, predicen resultados y recomiendan acciones a los productores y agrónomos, para mejorar la productividad y la sostenibilidad (Haloui et al., 2024; Liu et al., 2021; Martínez-Vásquez & Vázquez-García, 2019).

La introducción de dispositivos de IoT, que son capaces de comunicarse entre sí y con sistemas centralizados, permite el monitoreo y control continuos de los procesos agrícolas, desde el riego y la fertilización hasta el manejo de plagas y la cosecha. Al automatizar muchas de las tareas que antes se realizaban manualmente, la agricultura inteligente tiene el potencial de reducir los costos laborales, aumentar el rendimiento de los cultivos y minimizar el impacto ambiental de la agricultura (Butu et al., 2023; Liu et al., 2021; Zambon et al., 2019).

La creciente disponibilidad de tecnologías de IA e IoT a principios de la década de 2010, fue de los principales factores que originaron la Agricultura 4.0. Durante esta década, los avances en el aprendizaje automático, la computación en la nube y la tecnología de sensores comenzaron a hacer posible que los agricultores

implementaran estas tecnologías a gran escala, aunque no tan rápido como ocurrió en la Industria 4.0. Los avances en computación e IA, en particular, desempeñaron un papel crucial en la creación de esta Revolución Agrícola Inteligente, al proporcionar la potencia computacional necesaria para analizar grandes cantidades de datos del Sector Agropecuario y generar información útil para los productores (Liu et al., 2021; Obaid et al., 2024).

Los algoritmos de aprendizaje automático o “Machine Learning”, un área de la IA, son capaces de identificar patrones en los datos y hacer predicciones basadas en esos patrones, permitieron a los expertos apoyar a los agricultores para optimizar el uso de recursos como el agua, los fertilizantes y los pesticidas. Por ejemplo, los sistemas impulsados por IA pueden analizar los niveles de humedad del suelo, las condiciones meteorológicas, los rendimientos y los patrones de crecimiento de los cultivos para determinar el momento óptimo para el riego, reduciendo el desperdicio de agua y mejorando la salud de los cultivos (Dey et al., 2024; Tanaka et al., 2024; van Klompenburg et al., 2020).

El Internet de las Cosas o IoT es otro facilitador clave de la Agricultura 4.0 o “Internet Agrícola de las Cosas” (The Agricultural Internet of Things). El IoT se refiere a la red de dispositivos interconectados que pueden recopilar, compartir y actuar sobre los datos en tiempo real. En la Agricultura 4.0, los dispositivos del IoT incluyen sensores que miden la humedad del suelo, la temperatura, humedad atmosférica, fertilización, entre otros; las estaciones meteorológicas de diversas escalas; los drones; los brazos robóticos; los satélites; y la diversa maquinaria automatizada, todos los cuales son capaces de comunicarse entre sí y con los sistemas de control central. Estos dispositivos proporcionan a los Agrónomos especializados un flujo constante de datos sobre las condiciones de sus cultivos, clima y factores para la distribución de los alimentos (Adve et al., 2024; Obaid et al., 2024; Rabhi et al., 2023; Vatambeti et al., 2023).

De esta manera, los productores pueden tomar decisiones informadas sobre cuándo preparar el suelo, sembrar, regar, desmalezar, fertilizar, controlar plagas, monitorear enfermedades, cosechar y distribuir. Por ejemplo, los sensores de

humedad del suelo pueden detectar cuándo el suelo está demasiado seco y activar automáticamente un sistema de riego para suministrar la cantidad precisa de agua necesaria, haciendo un uso eficiente del agua agrícola. De manera similar, los drones equipados con cámaras multispectrales pueden monitorear la salud de los cultivos e identificar áreas que requieren atención, como aquellas afectadas por plagas o enfermedades (Liu et al., 2021; Obaid et al., 2024; Rabhi et al., 2023; Zambon et al., 2019).

A pesar de la promesa de la Agricultura 4.0, las primeras etapas de su desarrollo estuvieron marcadas por varios desafíos, particularmente en términos de resiliencia y eficiencia. Si bien las tecnologías de IA y el IoT ofrecieron mejoras significativas en precisión y control, también dependieron en gran medida de una conectividad a Internet confiable (en las superficies agrícolas), fuentes de alimentación e infraestructura de datos. En muchas áreas rurales, especialmente en países en desarrollo, estos recursos a menudo faltan, lo que dificulta que los agricultores más necesitados implementen soluciones relacionadas con la agricultura de precisión (Fragomeli et al., 2024; Gyamfi et al., 2024; Zambon et al., 2019).

Además, la complejidad de estos sistemas resalta la necesidad de nuevos conocimientos avanzados y una capacitación especializada por parte de los agricultores y expertos agrícolas, para operar y mantener, de manera efectiva, las diversas innovaciones tecnológicas en sus sistemas de producción. Esto acrecentó la brecha digital que nació desde la Agricultura 2.0, particularmente para los pequeños y medianos productores, con prácticas y métodos tradicionales de producción agropecuaria. Este tipo de productores han carecido de los recursos financieros, los conocimientos y la experiencia técnica para invertir e implementar todas estas innovaciones de Agricultura 4.0 (Fragomeli et al., 2024; Gyamfi et al., 2024).

Otro problema importante que surgió en la Agricultura 3.0 fue la ciberseguridad. A medida que las grandes granjas y los sistemas de producción del Sector Agropecuario se vuelven más conectados y dependientes de los sistemas

digitales, también son más vulnerables a los ciberataques. Los piratas informáticos pueden obtener acceso a los diversos dispositivos del IoT robar datos o alterar el sistema inteligente. A medida que los agricultores empezaron a recopilar más información sobre sus campos, cultivos, ganado, clima y precios de mercado, la necesidad de proteger estos datos se hizo más crítica. Esta información guardada en la nube es valiosa para los competidores, gobiernos y otras organizaciones internacionales (Alqudhaibi et al., 2024; Bui et al., 2024; Vatambeti et al., 2023).

La implementación de la Agricultura 4.0, al igual que la Agricultura 3.0, también pone de relieve la necesidad de una mayor sostenibilidad en las prácticas agrícolas. Si bien las tecnologías de IA e IoT ofrecen mejoras significativas en la eficiencia de las prácticas agrícolas convencionales, también plantean inquietudes sobre el impacto ambiental de estos sistemas. Se tiene la necesidad de un manejo de la producción y eliminación de dispositivos de IoT, como sensores, robots y drones, ya que contribuyen a la generación de desechos electrónicos (Rajesh Kumar K. V., 2024; Vastola et al., 2023). Además, se requiere de una cantidad importante de energía para alimentar a todos los dispositivos y vehículos terrestres y aéreos, que pueden aumentar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera por las operaciones agrícolas (Guan et al., 2023; Lampridi et al., 2020).

En respuesta a estos desafíos, muchos investigadores y desarrolladores de tecnología comenzaron a explorar el uso de fuentes de energía renovables, como la energía solar, eólica y nuclear, para reducir el impacto ambiental de la Agricultura 4.0. Al integrar la energía renovable en el diseño de dispositivos de IoT y maquinaria automatizada, se hace posible crear sistemas agrícolas más sostenibles que dependan menos de los combustibles fósiles (Bissadu et al., 2024; Guan et al., 2023; Gyamfi et al., 2024).

El concepto de fábricas inteligentes, que surgió durante las primeras etapas de la Cuarta Revolución Industrial, también comenzó a influir en el desarrollo de la agricultura de precisión. Las fábricas inteligentes son instalaciones de fabricación

altamente automatizadas que utilizan IA, IoT y sistemas ciberfísicos para optimizar los procesos de producción. En la Agricultura 4.0, los principios de las fábricas inteligentes se están aplicando principalmente al diseño de invernaderos automatizados, granjas verticales y otros sistemas agrícolas de entorno extremadamente controlado de las grandes trasnacionales (Liu et al., 2021; Mishra et al., 2024).

Estos sistemas utilizan sensores, robots y algoritmos de IA para monitorear y controlar cada aspecto del proceso de cultivo, desde la temperatura y la humedad hasta los niveles de luz y nutrientes. Al crear un entorno totalmente automatizado y autorregulado, los sistemas de la Agricultura 4.0 pueden lograr producir una mayor cantidad de alimentos de manera más precisa, con menos insumos y en cualquier época del año. Logrando superar algunos desafíos de los métodos agrícolas tradicionales. Aunque, se sigue esperando ver que sean sostenibles a largo plazo (Liu et al., 2021; Mishra et al., 2024; Symeonaki et al., 2024).

La cuarta Revolución Industrial se ve eclipsada por la quinta Revolución Industrial que, se estima, tuvo sus orígenes en las innovaciones del 2020, tendrá un papel clave en el impulso del desarrollo de la Agricultura 4.0 para llevarla a la nueva Agricultura 5.0. Esta Revolución Agrícola Superinteligente, se caracteriza por la convergencia de la Inteligencia Artificial Avanzada que transformará las industrias en todo el mundo, incluida la primera actividad inteligente del hombre y creadora de civilizaciones: la agricultura. Estas innovaciones sentarán las bases y los pilares para el futuro de la Agricultura 5.0, donde se espera hacer que las prácticas agrícolas avanzadas sean más eficientes, sostenibles y resilientes, frente a los monumentales desafíos globales a largo plazo (Gyamfi et al., 2024; Liu et al., 2021; Symeonaki et al., 2024; Zambon et al., 2019).

2.1.6 Agricultura 5.0

El modelo agrícola convencional, que se basa en gran medida en el monocultivo, los insumos químicos y el uso extensivo de la tierra, ha llegado a sus límites ecológicos. La Revolución Verde de mediados del siglo XX, que surgió en México

y que aumentó drásticamente la producción de alimentos mediante la adopción de variedades de cultivos de alto rendimiento, fertilizantes sintéticos y pesticidas, fue una solución temporal a corto plazo y que no abordó los problemas subyacentes de la sostenibilidad y la degradación ambiental (Cerutti, 2019; GCMA, 2022, 2024; Gutiérrez Núñez, 2020).

La Agricultura 5.0 surgió como respuesta a estos fracasos y al desarrollo tecnológico de la Industria 5.0, ofreciendo un enfoque holístico que integra tecnologías de vanguardia para crear un verdadero sistema alimentario resiliente y sostenible (Ahmad & Nabi, 2021; Haloui et al., 2024; Victor et al., 2024).

En el núcleo de la Agricultura 5.0 se encuentra la Inteligencia Artificial General (AGI, por sus siglas en inglés, Artificial General Intelligence), que se perfila como la innovación más trascendental de mediados del siglo XXI. A diferencia de cualquier otra tecnología creada por el hombre, la AGI es la única herramienta “Superinteligente”, de la historia. La AGI no tendrá límites, tanto en tiempo como en aprendizaje y capacidad de automejorarse. Comprende el lenguaje natural, las imágenes, audios, vídeos, da respuestas a situaciones complejas, mejora las capacidades de la Robótica 2.0, puede interactuar con el entorno, entre otras (Y. Chen et al., 2023; Dou et al., 2023; Jha et al., 2021; Lu et al., 2023).

Estas características convierten a la Inteligencia Artificial General en un elemento clave para revolucionar el Sector Agropecuario mundial, estableciendo una interrelación avanzada, extremadamente personalizada y futurista entre la humanidad, la tecnología, el medio ambiente y los mundos virtuales (Y. Chen et al., 2023; Dou et al., 2023; Jha et al., 2021; Lu et al., 2023).

Definición de Agricultura 5.0

El Sector Agropecuario global se encuentra en una fase de evolución acelerada. La Agricultura 5.0 se refiere a la nueva Revolución Agrícola Superinteligente que integra tecnologías avanzadas y se identifica por centrarse cada vez más en el ser humano, no en el sentido de depender del trabajo humano, ya que no

necesitará de esta acción directamente, sino en la forma en que los seres humanos y las máquinas están empezando a trabajar “juntos”. Una relación simbiótica que inició y se está desarrollando aún más rápido en la Industria 5.0, afectará a todo el sistema socioeconómico mundial, con el fin de buscar sostenibilidad, productividad, bienestar social y resiliencia ante los principales desafíos a futuro (Ahmad & Nabi, 2021; Fountas et al., 2024; Holzinger et al., 2024; Ragazou et al., 2022).

La Agricultura 5.0 iniciará una nueva Revolución Agrícola Superinteligente

Esta nueva era en el Sector Agropecuario mundial, donde la Agricultura 5.0 se centra en el trabajo de la Inteligencia Artificial Superinteligente con el ser humano, representa un cambio de enfoque de las máquinas como meras herramientas a las máquinas como colaboradores avanzados. Este cambio de paradigma también se acelerará por la integración eficiente de otras tecnologías de vanguardia como la Robótica 2.0, el Internet de las Cosas Hiperconectado y la Computación Cuántica que permitirán que la IA avanzada aprenda constantemente de su entorno, tome decisiones con mínima intervención humana e, incluso, interactuar con los humanos de maneras que antes eran del ámbito de la ciencia ficción (Ahmad & Nabi, 2021; Fountas et al., 2024; Jha et al., 2021).

El objetivo de esta Revolución Agrícola Superinteligente, centrado en el ser humano, es crear un sistema agrícola más resiliente y sostenible, que pueda satisfacer las crecientes demandas de una población mundial y, al mismo tiempo, abordar los desafíos globales crónicos como la inseguridad alimentaria, migraciones, cambio climático, crecimiento demográfico, crisis económicas, escasez de mano de obra y la degradación ambiental. Los métodos convencionales de producción de alimentos, que a menudo son insostenibles y consumen muchos recursos, ya no son suficientes para enfrentar estos desafíos. La Agricultura 5.0 busca ser más adaptables a las condiciones ambientales cambiantes y más eficiente en su uso de los recursos (Ahmad & Nabi, 2021; Victor et al., 2024).

En el centro de esta transformación se encuentra el concepto de Agricultura Superinteligente, que se refiere al uso de Inteligencia Artificial avanzada para optimizar las prácticas agrícolas. Esta IA está diseñada para imitar los procesos de pensamiento humanos, lo que les permite aprender de la experiencia, adaptarse a nueva información y tomar decisiones basadas en el Big Data en tiempo real. En la agricultura, estos sistemas cognitivos se pueden utilizar para monitorear la salud de los cultivos, predecir patrones climáticos, optimizar el uso de los recursos, las cosechas, etcétera, todo en tiempo real. Por ejemplo, los robots con IA podrán analizar todos los datos de sensores del IoT colocados en el suelo para determinar el momento óptimo para sembrar, regar y fertilizar eficientemente los cultivos (Ahmad & Nabi, 2021; Taj & Jhanjhi, 2022).

Estos sistemas también pueden detectar signos tempranos de enfermedades o infestaciones de plagas en cada planta, lo que permitirá a los agricultores y agrónomos especializados observar qué medidas preventivas necesarias se aplicaron al cultivo antes de que el problema se propague o afecte los rendimientos. Se están desarrollando robots autónomos o cobots (robots colaborativos, por sus siglas en inglés, *collaborative robots*) para realizar una amplia gama de tareas agrícolas, a diferencia de la maquinaria agrícola convencional de la Agricultura 4.0, que suele estar diseñada para que el productor tome la mayoría de las decisiones (Adve et al., 2024; Hassoun et al., 2024; Jha et al., 2021).

La integración de la Inteligencia Artificial General con los robots se le conoce como Robótica 2.0 (Jha et al., 2021). Por ejemplo, los cobots pueden recorrer los campos de forma independiente, identificando malezas, plagas y enfermedades sin necesidad de supervisión humana. También estarán diseñados para trabajar en entornos que son demasiado peligrosos o difíciles para los humanos, como en condiciones climáticas extremas o en campos contaminados con productos químicos peligrosos (Ahmad & Nabi, 2021; Haloui et al., 2024).

El desarrollo de los cobots en la agricultura está estrechamente vinculado al auge de las redes de sensores inalámbricos del IoT, que se utilizan para recopilar y

transmitir datos sobre las condiciones de los cultivos, el suelo y el medio ambiente. El IoT consiste en una red de sensores interconectados que se comunican entre sí y con los sistemas de control central, proporcionando a los agricultores información en tiempo real sobre sus campos. Estos sensores pueden medir una amplia gama de variables, como la humedad del suelo, la temperatura, la humedad y los niveles de luz, todos ellos fundamentales para optimizar el crecimiento de los cultivos. Al integrar el IoT con la IA y la robótica, los agricultores pueden crear un sistema totalmente automatizado (Jha et al., 2021; Martos et al., 2021; Victor et al., 2024).

El surgimiento de la Agricultura 5.0 es parte de una tendencia más amplia conocida como la Industria 5.0 o Quinta Revolución industrial, que se caracteriza por la convergencia de sistemas digitales, físicos y biológicos, a diferencia de la Industria 4.0, que se centró solo en la automatización y precisión de los procesos de producción. También se identifica a la Industria 5.0 como “Sociedad 5.0”, la cual pone énfasis en la personalización masiva y el uso de tecnologías cognitivas avanzadas para crear sistemas altamente personalizados y adaptativos (Bissadu et al., 2024).

En la Agricultura 5.0, esto significa el desarrollo de sistemas que puedan responder a las necesidades específicas de cada tipo de productor, granja, cultivo e incluso, por plantas individuales. Por ejemplo, los algoritmos de IA pueden analizar datos de una variedad de fuentes para crear planes de cultivo personalizados para cada campo, teniendo en cuenta factores como el tipo de suelo, los microclimas y la variedad de cultivos. El concepto de personalización masiva en la Agricultura 5.0 se relaciona con la capacidad de la IA avanzada de aprender constantemente de la experiencia, lo que les permite adaptarse a las condiciones cambiantes y mejorar con el tiempo. Esta característica hace a la IA la primera herramienta que no tiene límites para aprender y mejorarse (Adve et al., 2024; Ahmad & Nabi, 2021; Taj & Jhanjhi, 2022).

En la agricultura, esto significa crear sistemas creados en una red de cobots que pueden monitorear y ajustar continuamente las prácticas agrícolas para

maximizar la eficiencia y la sostenibilidad. La comunicación entre los cobots estará disponible entre una gran cantidad de diferentes áreas de producción del mundo, en tiempo real. Una característica de la Agricultura 5.0 que no tiene precedentes en ninguna de las revoluciones agrícolas anteriores. Por ejemplo, un sistema de producción cognitiva podría utilizar datos de sensores de IoT para ajustar los niveles de riego en función de las condiciones meteorológicas en tiempo real, lo que garantiza que los cultivos reciban la cantidad óptima de agua sin desperdiciar este recurso (Alam et al., 2022; Dorado et al., 2018; Rehman et al., 2024; Suryo Putro S et al., 2018).

Otra de las innovaciones avanzadas clave en el desarrollo de la Agricultura 5.0 es el uso de sistemas ciberfísicos o “gemelos digitales” (*Digital Twins*), que integran procesos físicos con tecnologías digitales. Los gemelos digitales se utilizan para controlar y monitorear una amplia gama de procesos agrícolas, desde la siembra y la cosecha hasta el riego y el manejo de plagas y enfermedades. Estos sistemas se basan en sensores, actuadores y algoritmos de IA avanzada para garantizar que las máquinas funcionen de manera eficiente y segura (Slob et al., 2023; Symeonaki et al., 2024).

Por ejemplo, un gemelo digital en un invernadero vertical automatizado permite monitorear la temperatura, la humedad y los niveles de CO₂, y luego ajustar los sistemas de ventilación, calefacción e irrigación para mantener condiciones óptimas de crecimiento. Al integrar procesos físicos con gemelos digitales se logra un mayor nivel de automatización y control en la agricultura, lo que reduce la necesidad de intervención humana y mejora la eficiencia general de las operaciones agrícolas (Mishra et al., 2024; Slob et al., 2023). El análisis en tiempo real, de todos los procesos de un invernadero vertical completamente automatizado, un sistema de producción agrícola, una región ganadera o un Sector Agropecuario de un país, generará una gran cantidad de datos, lo que dará comienzo al verdadero Big Data del futuro (Alahmad et al., 2023; Huo et al., 2024; Wolfert et al., 2017).

Toda esta información se logrará procesar en tiempo real en computadoras cuánticas, con una mayor velocidad que las supercomputadoras modernas actuales. La computación cuántica también será útil en el análisis del código genético (Innan & Khan, 2023) y en la selección artificial de especies nuevas de cultivos o ganado (Iram et al., 2019), control de calidad, condiciones ambientales (Tedeschi, 2024), diagnóstico más preciso de enfermedades infecciosas en los cultivos (Mukhamedieva & Sobirov, 2024), clasificación precisa de plagas (Saranya et al., 2023), potenciar la gestión sostenible de cultivos y la productividad del Sector Agropecuario (Maraveas et al., 2024).

La creciente dependencia de la AGI, la Robótica 2.0 y las tecnologías de IoT en la Agricultura 5.0 también plantea importantes preocupaciones de ciberseguridad. A medida que las explotaciones agrícolas se conectan cada vez más y dependen completamente de los gemelos digitales, también se vuelven más vulnerables a los ciberataques. En un escenario hipotético, un ciberataque a un sistema de riego automatizado podría provocar que los cultivos se rieguen en exceso o en defecto, lo que provocaría una reducción de los rendimientos o el fracaso de los cultivos. Del mismo modo, una vulneración de los datos confidenciales daría a los competidores una ventaja injusta (K. Bissadu, Hossain, & Vajpayee, 2024; K. Bissadu, Hossain, Velagala, et al., 2024; Verma et al., 2023).

La cuestión de la ciberseguridad en la agricultura se complica aún más por la creciente dependencia de la computación en la nube para almacenar y analizar datos agrícolas. Si bien la computación en la nube ofrece ventajas significativas en términos de escalabilidad y accesibilidad, también introduce nuevos riesgos, ya que estos sistemas suelen ser el objetivo de los ciberdelincuentes que buscan explotar las vulnerabilidades de la infraestructura en la nube. Garantizar la seguridad en el Big Data es esencial para los agricultores, los desarrolladores de tecnología y los responsables de las políticas. Una solución es el uso del Blockchain para crear registros a prueba de manipulaciones de las actividades

agrícolas (Ahamed & Vignesh, 2022; K. Bissadu, Hossain, & Vajpayee, 2024; K. Bissadu, Hossain, Velagala, et al., 2024).

El auge de la Agricultura 5.0, centrada en el ser humano, también plantea importantes desafíos a futuro, que se relacionan con el impacto en la mano de obra y las prácticas convencionales y conocimientos tradicionales. Si bien la automatización masiva tiene el potencial de reducir los costos laborales y aumentar la productividad, también amenaza con desplazar a millones de trabajadores, en particular en los países en desarrollo a largo plazo, donde la agricultura es una fuente importante de empleo. La transición a la Agricultura 5.0 debe ir acompañada de políticas que promuevan la educación y la capacitación constante, ayudando a los trabajadores agrícolas a desarrollar las habilidades necesarias para prosperar en un mundo cada vez más cambiante y automatizado (Assimakopoulos et al., 2024; Fountas et al., 2024; Haloui et al., 2024).

Un desafío significativo en la introducción y desarrollo de la Agricultura 5.0 se relaciona con la demanda y la oferta de alimentos personalizados. Conforme los consumidores se vuelven más conscientes de los impactos ambientales y sociales de sus elecciones alimentarias, existe una creciente demanda de alimentos sostenibles. La Agricultura 5.0 integrada, con su enfoque en la sostenibilidad y la resiliencia, tiene el potencial de satisfacer estas demandas especializadas. Por ejemplo, los cobots con IA avanzada pueden apoyar a los agricultores para reducir el uso de agua, fertilizantes y pesticidas solo donde se necesite, minimizando el impacto ambiental y garantizando la sostenibilidad y nutrición (Bissadu et al., 2024; Haloui et al., 2024; Holzinger et al., 2024).

Es fundamental que estos desafíos, y otros que aún no se reconocen, se aborden de manera equitativa en los tipos de productores. Esto permitirá que los beneficios sean globales y que el efecto de esta nueva Revolución Agrícola Superinteligente sea favorable para todos. De lo contrario, la integración de la IA avanzada, la Robótica 2.0, el IoT, los gemelos digitales y otras tecnologías no permitirá que la Agricultura 5.0 genere un sistema agrícola mundial sostenible, resiliente y eficiente. La Quinta Revolución Agrícola, enfocada en la Sociedad 5.0

debe tener el objetivo de promover el bienestar social, garantice la seguridad, la restauración de los recursos y el desarrollo científico y tecnológico (Bissadu et al., 2024; Haloui et al., 2024; Jha et al., 2021; Symeonaki et al., 2024).

2.2 Geopolítica en la Agricultura 5.0: Competencia entre las potencias mundiales por la Inteligencia Artificial más Avanzada

A medida que el Sector Agropecuario mundial experimenta una profunda transformación con el auge de la Agricultura 5.0, el panorama geopolítico también se está modificando drásticamente. La integración de la Inteligencia Artificial Superinteligente, la Robótica 2.0, el Internet de las Cosas Hiperconectado, la Computación Cuántica y los sistemas ciberfísicos en las prácticas agrícolas están revolucionando la producción de alimentos y también está creando nuevos escenarios de competencia entre las principales naciones. La agricultura, tradicionalmente vista como un asunto interno, es ahora un componente clave de la seguridad alimentaria y la dinámica de poder global (Bissadu et al., 2024; Fountas et al., 2024; Haloui et al., 2024; Jha et al., 2021).

La seguridad alimentaria es importante para el bienestar de la población de una nación y para su estabilidad política y resiliencia económica. Históricamente, las naciones con sectores agrícolas fuertes han tenido una ventaja estratégica en tiempos de guerra, crisis económica y agitación política. En el siglo XXI, mientras el mundo enfrenta desafíos como el cambio climático, el crecimiento demográfico y el agotamiento de los recursos, la capacidad de producir alimentos de manera eficiente y sostenible se ha vuelto aún más estratégico. La Agricultura 5.0 ofrece a las naciones las herramientas para mejorar su productividad agrícola, reducir el desperdicio y optimizar el uso de los recursos a futuro (Ahmad & Nabi, 2021; Haloui et al., 2024; Symeonaki et al., 2024).

Las naciones que lideran el desarrollo y la implementación de las tecnologías avanzadas de la Agricultura 5.0 se están posicionando para dominar los mercados alimentarios mundiales, asegurar sus propios suministros de alimentos e influir en el comercio y la diplomacia internacionales. Actualmente, las

implicaciones geopolíticas de la Agricultura 5.0 son de gran impacto en la cooperación entre las potencias mundiales, como China, Estados Unidos de Norteamérica, la Unión Europea, India e Israel. Los cuales se abordan a continuación (Baryshnikova et al., 2022; Bissadu et al., 2024).

2.2.1 Líderes mundiales en AGI y Agricultura 5.0

Las potencias mundiales han surgido como líderes en investigación, desarrollo e implementación de las tecnologías avanzadas en la Industria 5.0, cada una con sus propios objetivos estratégicos y ventajas competitivas. Principalmente, estos países están invirtiendo fuertemente en Investigación y Desarrollo (I+D), infraestructura y el mundo virtual para asegurarse de permanecer a la vanguardia de la innovación de la Inteligencia Artificial General (AGI), debido a que será el cerebro de todo el Sector Agropecuario (Dou et al., 2023; Lu et al., 2023). Como resultado, dominar las tecnologías de la Agricultura 5.0 se ha convertido en un objetivo clave para muchas naciones, lo que ha dado lugar a una nueva forma de competencia geopolítica (Baryshnikova et al., 2022).

Estados Unidos: Potencia de la innovación y la agroindustria

Estados Unidos de América (EUA) fue el líder mundial en innovaciones durante muchos años, en estos últimos siglos. En el presente, sigue desempeñando un papel dominante en el desarrollo de tecnologías de la Agricultura 5.0, pero junto a su máximo competidor, China, han generado una situación geopolítica crítica y que generará nuevos desafíos a futuro. El sector agrícola estadounidense se caracteriza por granjas comerciales a gran escala, infraestructura avanzada e inversión significativa en nuevas empresas de tecnología agrícola (AgTech, por sus siglas en inglés, *agricultural technology*) (Akintuyi, 2024; Baryshnikova et al., 2022).

Las empresas estadounidenses están a la vanguardia del desarrollo de tecnologías típicas de la Agricultura 5.0, como la AGI, Internet de las Cosas (IoT), Blockchain, Realidad Aumentada, Realidad Virtual, Robótica 2.0, Big Data,

plataformas de agricultura de precisión, drones y vehículos autónomos. Estas adopciones tecnológicas, por parte de los grandes productores estadounidenses, está evolucionando la forma en que se producen los alimentos en los sistemas convencionales (Adesiyan & Raffington, 2024; Akintuyi, 2024; Kato et al., 2024).

El gobierno de los EUA. reconoció la importancia estratégica de las nuevas tecnologías avanzadas de la Agricultura 5.0 e invirtió en una variedad de iniciativas para apoyar la transformación digital de su Sector Agropecuario, basado en una rápida adopción tecnológica. Programas como la Agenda de Innovación Agrícola y asociaciones con Silicon Valley han acelerado la adopción de IA y robótica en la agricultura. El Departamento de Agricultura de los EUA (USDA) también ha enfatizado la importancia de la ciberseguridad para proteger los sistemas agrícolas de los ciberataques, reconociendo que la creciente dependencia de las tecnologías digitales hace que las granjas sean vulnerables al robo de datos (Akintuyi, 2024; USDA, 2020).

El reto más grande de los EUA es garantizar que los beneficios de la Agricultura 5.0 se distribuyan equitativamente en su sector agrícola. Si bien las grandes granjas comerciales han adoptado rápidamente la IA y la robótica, los agricultores de pequeña escala, particularmente en las áreas rurales, han tenido dificultades para acceder a estas innovaciones debido a los altos costos y la infraestructura limitada. Esto ha suscitado inquietudes sobre la posibilidad de una mayor desigualdad tecnológica dentro del sector agrícola estadounidense, así como el riesgo de vulnerabilidades de ciberseguridad en explotaciones agrícolas más pequeñas y menos protegidas (Akintuyi, 2024; Alla Korotkikh, 2022; Rodrigues, 2023; USDA, 2020).

China: AGI al servicio del campo y la agrícola del futuro

China se está consolidando rápidamente como un líder global en la Industria 5.0. Su objetivo de desarrollo económico se centra en la implementación avanzada de tecnologías emergentes. Este enfoque incluye la creación y mejora continua de sistemas de Inteligencia Artificial Avanzada, la digitalización integral, la

robotización avanzada y la automatización masiva de procesos industriales. La estructura de gobierno china y sus políticas públicas estratégicas le permiten competir de manera efectiva con Estados Unidos. Así, crea un futuro propio que refuerza su influencia en la geopolítica global y la evolución sostenible de la Industria 5.0 y la Agricultura 5.0 (Aleksey & Sofya, 2020; Hu et al., 2022).

Las innovaciones tecnológicas son los pilares fundamentales en los esfuerzos de modernización del Sector Agropecuario en China. No obstante, el país enfrenta desafíos presentes y futuros significativos, tales como la degradación del suelo, la escasez de agua y la creciente demanda de alimentos saludables por parte de una de las poblaciones más grandes del mundo. Estos problemas hacen que la adopción de tecnologías agrícolas avanzadas y el desarrollo de una política alimentaria eficiente sean prioridades nacionales. En respuesta, el gobierno chino ha implementado una serie de iniciativas para integrar tecnologías agrícolas avanzadas como la Inteligencia Artificial General (AGI), el Internet de las Cosas (IoT), el Internet móvil, la tecnología 6G, la computación en la nube, el Big Data y la robótica (Aleksey & Sofya, 2020; Ji, 2023; Raevskaya, 2024).

Un ejemplo importante, es la iniciativa “Made in China 2025”, que tiene como objetivo posicionar a China como un líder global en innovación, fabricación e implementación de tecnologías avanzadas. Este programa industrial es crucial para las políticas actuales que están transformando varios sectores económicos. Gracias a esta estrategia, el Sector Agropecuario chino ha recibido un impulso significativo, facilitado por colaboraciones académicas, incentivos al talento, subsidios públicos, incentivos fiscales y financiamiento conveniente. Estas medidas permiten que las regiones agrícolas piloto adopten tecnologías avanzadas, promoviendo una modernización integral y sostenible (Branstetter & Li, 2022; K. Chen et al., 2024; Nawaz et al., 2024).

El gobierno de China también ha reconocido la importancia de la soberanía alimentaria como un problema geopolítico, en el contexto de las crecientes tensiones con EUA y otras naciones occidentales. Al invertir en tecnologías de Agricultura 5.0, China pretende reducir su dependencia de las importaciones de

alimentos y garantizar que puede satisfacer las necesidades de su población ante las interrupciones de la cadena de suministro global. Sin embargo, la rápida adopción de la AGI, IoT, red 6G, Big Data y la Robótica 2.0 en la agricultura plantea preocupaciones sobre la ciberseguridad, sostenibilidad y eficiencia de estas tecnologías a futuro (Cunbing, 2020; Ji, 2023; Zhang et al., 2024).

La Unión Europea: Sostenibilidad y agricultura inteligente

La Unión Europea (UE) se ha posicionado como líder en agricultura sostenible, con un fuerte énfasis en el uso de la IA y la IoT para reducir el impacto ambiental de la agricultura. La Política Agrícola Común (PAC) de la UE incluye disposiciones para la adopción de tecnologías de agricultura de precisión que optimicen el uso de los recursos, reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero y promuevan la biodiversidad. Países europeos como Alemania, los Países Bajos y Francia están a la vanguardia del desarrollo de sistemas agrícolas inteligentes que utilizan la IA avanzada para monitorear la salud de los cultivos, optimizar el riego y reducir el uso de pesticidas (Lebid et al., 2023; Munnisunker et al., 2022).

El enfoque de la UE en la sostenibilidad en la Agricultura 5.0 está impulsado por su compromiso con el Pacto Verde Europeo, que tiene como objetivo convertir a Europa en el primer continente climáticamente neutro para 2050. Como parte de esta iniciativa, la UE ha invertido en plataformas agrícolas digitales que ayudan a los agricultores a realizar la transición a prácticas agrícolas más sostenibles. Por ejemplo, la Agencia Espacial Europea (ESA) está utilizando imágenes satelitales y algoritmos de IA para monitorear la salud del suelo y el uso del agua en toda Europa, proporcionando a los agricultores datos en tiempo real para mejorar su toma de decisiones (H. Afshar et al., 2024; Munnisunker et al., 2022; Tian et al., 2024).

Sin embargo, la UE enfrenta desafíos para equilibrar sus objetivos de sostenibilidad con la necesidad de seguir siendo competitiva en el mercado agrícola mundial. Si bien los agricultores europeos han sido los primeros en

adoptar tecnologías avanzadas de la Agricultura 5.0, el alto costo de estos sistemas ha limitado su accesibilidad para los pequeños agricultores (H. Afshar et al., 2024; Lebid et al., 2023).

Además, las estrictas regulaciones de la UE sobre privacidad de datos y ciberseguridad han creado desafíos para la integración de IA e IoT en la agricultura, ya que las empresas deben navegar por marcos legales complejos para garantizar el cumplimiento del Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) (Munnisunker et al., 2022; Navdeep & Shallu, 2024; Negri-Ribalta et al., 2024).

Emiratos Árabes Unidos: Hacia un futuro agrícola moderno y sostenible en el desierto

Los Emiratos Árabes Unidos (UAE, por sus siglas en inglés, The United Arab Emirates) se han consolidado como una de las principales potencias mundiales en la implementación de Inteligencia Artificial General. Esta IA avanzada ha sido aplicada en diversos sectores, incluidos el petróleo, el gobierno, la salud, la educación y la agricultura. Ubicados en Oriente Medio, en el continente asiático occidental, los UAE comparten fronteras con Arabia Saudita y Omán. En la actualidad, los UAE destacan por ser una nación moderna que ha experimentado un rápido crecimiento hasta convertirse en una economía fuerte y próspera (Rashid, 2023; Sadiku et al., 2024b).

La economía de esta federación está dominada por la producción de petróleo y gas, principalmente en el emirato de Abu Dhabi. El rápido crecimiento demográfico de los UAE, por su estabilidad económica, ha motivado al gobierno a centrar sus esfuerzos en el desarrollo de alternativas para incrementar la producción y el suministro de alimentos, que dependen en gran medida de las importaciones. India y Pakistán son los principales proveedores de verduras, frutas y cereales a los mercados de los Emiratos Árabes Unidos durante todo el año. Este aumento en las importaciones es consecuencia de la política de

mercado abierto, que ha permitido a diversas empresas internacionales establecer nuevas sucursales en los UAE (Rashid, 2023; Sadiku et al., 2024b).

Actualmente, los Emiratos Árabes Unidos están invirtiendo fuertemente en la modernización tecnológica y científica de su Industria 5.0. Los EAU son reconocidos mundialmente por la aplicación y el impacto positivo de tecnologías avanzadas como la Inteligencia Artificial Avanzada, la Robótica 2.0, el Big Data y el Internet de las Cosas. Estas innovaciones han tenido un impacto significativo en diversos sectores, siendo la industria del petróleo uno de los más beneficiados. La IA se utiliza para optimizar la extracción y producción de hidrocarburos, así como para prever y mitigar riesgos ambientales (Arif & Al Senani, 2020).

En el sector gubernamental, la IA avanzada ha mejorado la eficiencia administrativa y la prestación de servicios públicos, facilitando procesos como la tramitación de documentos y la atención al ciudadano. En el ámbito de la salud, la IA se emplea en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, permitiendo una atención médica más precisa y personalizada. En el transporte, los sistemas inteligentes de tráfico y los vehículos autónomos están revolucionando la movilidad urbana (Almansoori & Al-Tahitah, 2021).

En el sector educativo, los UAE han adoptado la IA para mejorar la calidad de la enseñanza y el aprendizaje. La IA se utiliza para personalizar el contenido educativo según las necesidades de cada estudiante, así como para analizar el rendimiento académico y ofrecer recomendaciones específicas. Además, la IA ha facilitado la creación de entornos de aprendizaje virtual y el acceso a recursos educativos en línea, lo que ha ampliado las oportunidades de educación en el país (Johnson et al., 2022).

En la agricultura, los UAE están iniciando con la implementación de las tecnologías avanzadas características de la Agricultura 5.0. Estas tecnologías de vanguardia se utilizan para aumentar la eficiencia y sostenibilidad de la producción alimentaria en condiciones de clima árido, suelos poco fértiles,

recursos hídricos escasos y un menor número mano de obra que se dedica a la producción agrícola. Para enfrentar estos desafíos presentes y futuros, los UAE están utilizando ampliamente la robótica, agricultura vertical, hidroponía, sensores climáticos inteligentes, invernaderos altamente controlados y agricultura orgánica (Sadiku et al., 2024b; Salem et al., 2024).

La robótica se implementa para automatizar tareas agrícolas, como la siembra y la cosecha, mientras que la agricultura vertical y la hidroponía permiten cultivar alimentos en espacios reducidos y con un uso eficiente del agua. Además, los sensores climáticos inteligentes monitorean las condiciones ambientales y proporcionan datos en tiempo real para optimizar el crecimiento de los cultivos. Los invernaderos altamente controlados permiten mantener condiciones óptimas de cultivo durante todo el año, y la agricultura orgánica promueve prácticas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Sadiku et al., 2024b; Salem et al., 2024).

El enfoque de los UAE en la modernización e implementación de la AGI en la agrícola, ganadería y pesca busca reducir la dependencia de las importaciones, garantizar la seguridad alimentaria y promover la sostenibilidad en el país. Los UAE están comprometidos con la innovación y el desarrollo de tecnologías avanzadas de la Agricultura 5.0 que contribuyen a un futuro más próspero y sostenible (Rashid, 2023; Sadiku et al., 2024b; Salem et al., 2024).

Israel: Innovación en tecnologías de ahorro de agua

Israel, a pesar de ser un país pequeño y con clima árido, se ha convertido en un líder mundial en innovación agrícola, particularmente en el desarrollo de tecnologías de ahorro de agua. Frente a una grave escasez de agua, Israel ha sido pionero en el uso del riego por goteo, una tecnología que lleva agua directamente a las raíces de las plantas, lo que reduce el desperdicio de agua y aumenta el rendimiento de los cultivos (Slater et al., 2022; Tal, 2021).

En el contexto de la Agricultura 5.0, el enfoque de Israel en el riego de precisión ha evolucionado para incluir el uso de sensores de Internet de las Cosas y algoritmos de Inteligencia Artificial. Estos avances permiten monitorear los niveles de humedad del suelo en tiempo real y optimizar el uso del agua de manera más eficiente. La integración de estas tecnologías de vanguardia mejora la productividad agrícola y contribuye a la sostenibilidad al reducir el uso del agua en regiones con recursos hídricos limitados (Kimhi, 2024; Sadiku et al., 2024a).

Las empresas israelíes como Netafim y CropX están a la vanguardia del desarrollo de sistemas de riego inteligentes que utilizan datos de sensores de IoT para proporcionar a los agricultores información en tiempo real sobre sus necesidades de agua. Estos sistemas serán valiosos en las regiones o países que enfrentan sequías extremas, contaminación de aguas y zonas urbanas donde el uso eficiente del agua será fundamental para mantener la productividad agrícola cerca a estas megalópolis. La experiencia de Israel y las tecnologías de la Agricultura 5.0 serán claves al 2050, donde el cambio climático agravará la escasez de agua en muchas partes del mundo (Ahmad & Nabi, 2021; Fountas et al., 2024; Sadiku et al., 2024a; Slater et al., 2022).

Al igual que Israel, la mayoría de los países en desarrollo buscarán implementar las tecnologías avanzadas de Agricultura 5.0 que mejor se adapten a sus condiciones climáticas, geográficas, tipos de suelo, disponibilidad de agua dulce, crecimiento en la demanda de alimentos y problemas sociales y económicos (Baryshnikova et al., 2022; Sadiku et al., 2024a).

Únicamente las potencias mundiales serán las líderes en la implementación de la Inteligencia Artificial General integrada a diversas tecnologías avanzadas en todos sus sectores (Akintuyi, 2024; Aleksey & Sofya, 2020; Baryshnikova et al., 2022; Munnisunker et al., 2022; Rashid, 2023; Salem et al., 2024). Los países en desarrollo tendrán la oportunidad de adaptarse según su disposición de los actores clave, capacitación de los agricultores, apoyo gubernamental, infraestructura existente y capacidad económica y científica para lograr una

adopción tecnológica eficiente en cada región y tipo de productor (Baryshnikova et al., 2022; FAO, 2018; OECD & FAO, 2024; Sadiku et al., 2024a).

2.3 Impacto de la AGI en la Sociedad 5.0, Industria 5.0 y Agricultura 5.0

La carrera por las innovaciones avanzadas en la Industria 5.0 ha generado una dinámica geopolítica compleja entre potencias como Estados Unidos (Akintuyi, 2024), China (Aleksey & Sofya, 2020) y Rusia (Orlova & Nikolaev, 2022). Estas naciones están invirtiendo fuertemente en el desarrollo e implementación de Inteligencia Artificial General para potenciar sus diversos sectores de la Industria 5.0, Agricultura 5.0 y defensa nacional (Baryshnikova et al., 2022; Shahini et al., 2022).

Este avance tecnológico está redefiniendo la carrera armamentista global, situando a todos los países en un estado de alerta debido a los Sistemas de Armas Autónomas Letales (SAAL), más que a las aplicaciones autónomas en los sistemas nucleares (Figura 2). Los SAAL son más preciosos, sigilosos y ocuparán un papel importante en las guerras futuras. Estos desarrollos plantean importantes desafíos futuros, destacándose las amenazas a la seguridad internacional y nacional, obligando a una revisión continua de las políticas de defensa y cooperación global (Khan et al., 2021; Bissadu et al., 2024).

La búsqueda de innovaciones avanzadas en la Industria 5.0 ha propiciado una compleja relación geopolítica entre Estados Unidos, China, Rusia y otras potencias mundiales. Estas naciones destinan gran cantidad de sus recursos al desarrollo e implementación de Inteligencia Artificial General para potenciar sus sectores de Industria 5.0, Agricultura 5.0 y estrategias de defensa para implementar lo que se conocerá, hacia el año 2050, como Sociedad 5.0 (Akintuyi, 2024; Baryshnikova et al., 2022; Bissadu et al., 2024).

Esta nueva era en la carrera armamentista global pone a todas las naciones en una situación de extrema tensión debido a las altas implicaciones y consecuencias futuras de los Sistemas de Armas Autónomas Letales y la

potencial autonomía de los sistemas nucleares, que ha concebido la Inteligencia Artificial General, principalmente el Aprendizaje Profundo (Más conocido como *Deep Learning*). El Deep Learning es un enfoque específico dentro del Aprendizaje Automático (*Machine Learning*), un área de la IA, que utiliza Redes Neuronales Profundas para la toma de decisiones y la resolución de problemas específicos (Khan et al., 2021).

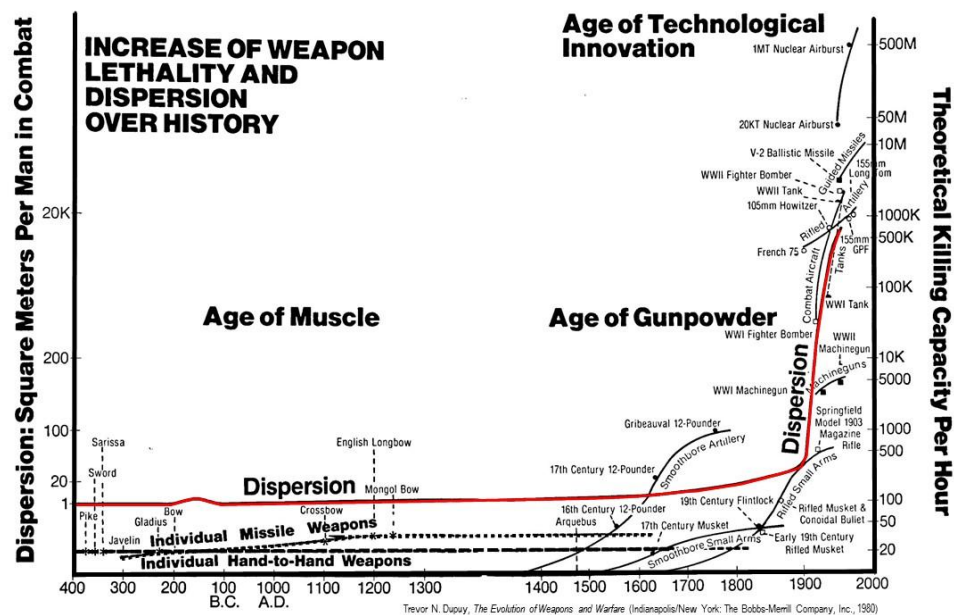


Figura 2-2. Comportamiento histórico de la capacidad destructiva humana vinculado a los avances tecnológicos.

Fuente: Khan et al., 2021.

Estos desarrollos podrían acarrear los desafíos futuros más importantes de nuestra era, en cuanto a seguridad internacional y nacional, obligando a las naciones a la revisión continua de las estrategias y colaboraciones entre los países (Khan et al., 2021; Baryshnikova et al., 2022; Bissadu et al., 2024).

2.4 La Agricultura 5.0 en las Economías en Desarrollo y Emergentes

La crisis alimentaria mundial constituye una realidad devastadora que afecta a millones de personas. En 2023, más de 733 millones de personas padecieron hambre, con una prevalencia notable en países de bajos ingresos (FAO et al.,

2024). La pandemia de COVID-19 agravó esta situación, desencadenando una crisis económica global que impactó especialmente a los países en desarrollo (Goodell, 2020). Esta intersección entre la pandemia y la seguridad alimentaria subraya la urgencia de adoptar medidas integrales y coordinadas para mitigar los efectos adversos y promover la resiliencia en los sistemas alimentarios mundiales (FAO, 2024).

Las Perspectivas Agrícolas 2024-2033 de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) identifican varios desafíos significativos que enfrentarán los países en desarrollo y emergentes. Entre los problemas destacados están el agotamiento de los suelos fértiles, los eventos climáticos extremos, el agotamiento de recursos naturales, la resistencia a antimicrobianos, la regulación genética, las tensiones comerciales, y la propagación de plagas y enfermedades resistentes a los agroquímicos. Estos factores complicarán el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030 (ONU, 2018).

En 25 años de las Perspectivas Agrícolas 2024-2033 de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) advierten sobre los desafíos futuros que afectarán a los países en desarrollo y emergentes. Se destaca el agotamiento de los suelos fértiles, eventos climáticos extremos, agotamiento de los recursos, resistencia a antimicrobianos, regulación genética, tensiones comerciales, propagación de plagas y enfermedades más resistentes a los agroquímicos en los cultivos y el ganado dominantes. Esto dificultará cumplir los ODS para 2030 (ONU, 2018).

2.5 Perspectivas Agrícolas de la OCDE-FAO en el corto plazo

A continuación, se realizó un análisis comparativo de las Perspectivas Agrícolas 1999-2004 de la OCDE-FAO con la última edición del informe de las Perspectivas Agrícolas 2024-2033 de la OCDE-FAO, para determinar los avances y desafíos.

Las Perspectivas Agrícolas de la OCDE-FAO proporcionan evaluaciones y proyecciones detalladas a corto plazo de los mercados agropecuarios y pesqueros globales. Este análisis compara las ediciones de 1999 y 2024, destacando similitudes, diferencias y evaluando los logros y desafíos pendientes durante este período de 25 años. Estas evaluaciones son esenciales para entender las dinámicas y tendencias que moldean el futuro del Sector Agropecuario a nivel nacional, regional y mundial para servir de referencia a los responsables de políticas y otros actores relevantes (OECD & FAO, 1999, 2024).

2.5.1 Perspectivas Agrícolas de 1999

La edición de 1999, “Perspectivas Agrícolas 1999-2004 de la OCDE-FAO”, se publicó en un momento en el que los precios agrícolas fueron más bajos, desde principios de los años cincuenta, atribuibles a grandes suministros y una demanda débil. El informe abordó datos desde 1970, la recuperación de los mercados mundiales y las implicaciones de la crisis financiera en China, Rusia y América Latina. Se identificaron los siguientes desafíos: el bienestar animal, la eliminación de residuos, mejorar el precio del mercado mundial y el impacto de las diferentes tecnologías de producción de alimentos en el medio ambiente. Además, se discutieron las tensiones comerciales y la regulación de la ingeniería genética (OECD & FAO, 1999).

Pronósticos Clave al 2004 (OECD & FAO, 1999):

- Recuperación de precios en el nuevo milenio debido a la recuperación económica y ajustes de oferta y la demanda.
- Impacto significativo de las políticas agrícolas y comerciales en las proyecciones de mercado.
- Emergencia de nuevas cuestiones como la seguridad alimentaria y el bienestar animal que influirán en las políticas a largo plazo.

- Se previó un mayor crecimiento de las exportaciones para las carnes (cerdo y aves), leche entera en polvo, el queso y los cereales.

2.5.2 Perspectivas Agrícolas de 2024

La edición de 2024, “Perspectivas Agrícolas 2024-2033 de la OCDE-FAO”, ofrece una evaluación consensuada de las perspectivas a diez años de los mercados de productos agropecuarios y pesqueros. Destaca la importancia de las economías emergentes, especialmente India, que se espera superará a China como actor principal en la demanda de alimentos. Por lo tanto, ¿China alcanzará la seguridad alimentaria al 2033? Las proyecciones también incluyen una disminución de la intensidad de gases de efecto invernadero, aunque las emisiones directas de la agricultura podrían aumentar. Se enfatiza que reducir la pérdida y desperdicio de alimentos podría disminuir las emisiones globales y el número de personas desnutridas (OECD & FAO, 2024).

La transición de India a una posición de liderazgo en el panorama agrícola global refleja cambios demográficos y económicos significativos de esta nación, incluyendo el aumento de la inversión en ciencia y tecnologías agrícolas avanzadas, como la Inteligencia Artificial. Se espera que estas tecnologías de vanguardia de la Agricultura 5.0 permitan un mayor enfoque en la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, logrando prácticas agrícolas con el objetivo de ser sostenibles (OECD & FAO, 2024).

Pronósticos Clave al 2033 (OECD & FAO, 2024):

- Predominio de India sobre China en el panorama agrícola mundial, principalmente en el consumo mundial de alimentos.
- India y el sudeste asiático estarán aumentando la demanda de alimentos, gracias al aumento de su población urbana y su creciente riqueza.

- Se proyecta un aumento del 7% en la ingesta de calorías en los países de ingresos medianos y del 4% en los países de bajos ingresos, lo cual es insuficiente para alcanzar el ODS 2, de hambre cero para 2030.
- Reducir a la mitad la pérdida y desperdicio de alimentos podría disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero agrícolas en un 4% y el número de personas desnutridas en 153 millones para 2030.
- Disminución de la intensidad de gases de efecto invernadero, con un aumento de emisiones directas del 5%, debido al incremento en la productividad y no a la expansión de tierras cultivadas.
- Importancia continua de los mercados internacionales para la seguridad alimentaria y medios de vida rurales.
- Aumento de la producción debido a la implementación avances tecnológicos y mediante el aumento del uso de sus recursos naturales.
- Se proyecta una ligera caída en los precios internacionales reales de referencia de los principales productos agropecuarios en la próxima década, aunque esto puede no reflejarse en los precios locales debido a factores como la inflación y los costos logísticos.

2.5.3 Relación directa de las Perspectivas Agrícolas de la OECD-FAO

Similitudes:

Ambos informes de las Perspectivas Agrícolas de la OCDE-FAO destacan preocupaciones comunes y urgentes como el agotamiento de suelos y recursos naturales, lo que subraya la necesidad crítica de reformas en políticas agrícolas. Estos informes insisten en la importancia de abordar estos problemas mediante la implementación de políticas efectivas y sostenibles (OECD & FAO, 1999).

La seguridad alimentaria y la resiliencia de los sistemas alimentarios son temas recurrentes que se abordan con detalle en ambos documentos, reflejando una

preocupación constante por asegurar un suministro estable y accesible de alimentos nutritivos. La importancia de las políticas gubernamentales y las reformas agrícolas sigue siendo fundamental para las proyecciones de mercado, ya que estas políticas determinan en gran medida la capacidad de los países para adaptarse a desafíos ambientales, sociales y económicos en constante evolución (OECD & FAO, 1999).

Diferencias:

En el año 1999, las Perspectivas Agrícolas de la OCDE-FAO centraron su análisis en las repercusiones de la crisis financiera en regiones específicas, como el sudeste asiático, Rusia y América Latina. Esta crisis afectó gravemente la demanda de productos agrícolas, lo que contribuyó a la caída de los precios agrícolas mundiales. Sin embargo, no se abordó con tanto detalle el impacto de las emisiones agrícolas en el medio ambiente (OECD & FAO, 2024).

Por otro lado, el informe de 2024 desplaza su enfoque hacia el papel emergente de India en el panorama agrícola mundial, anticipando que superará a China como actor principal. Además, se presta una atención considerable a la reducción de desperdicios alimentarios y al uso de tecnologías avanzadas de la Agricultura 5.0 para mejorar la sostenibilidad global. Este cambio de enfoque refleja una mayor conciencia sobre la sostenibilidad ambiental y la eficiencia en la producción agrícola con tecnologías de vanguardia (OECD & FAO, 1999, 2024).

Logros:

Comparando los informes de las Perspectivas Agrícolas de la OCDE-FAO de 1999 y 2024, se observa una mejora significativa en las políticas agrícolas y comerciales. Estas reformas han sido cruciales para promover la sostenibilidad y la resiliencia de los mercados agrícolas. Estas mejoras son el resultado de esfuerzos continuos para adaptar las políticas agrícolas a las necesidades cambiantes del sector, incluyendo la soberanía alimentaria y la sostenibilidad ambiental (OECD & FAO, 1999, 2024).

La adopción de tecnologías avanzadas está jugando un papel fundamental en la transformación del sector agrícola. Tecnologías típicas de la Agricultura 5.0, como AGI, robots autónomos e IoT están mejorando notablemente la eficiencia en la producción, optimizando el uso de recursos como agua, fertilizantes y pesticidas en los sistemas de producción de los grandes productores, en especial las empresas transnacionales. Además, se prevé que estas innovaciones tecnológicas contribuirán a largo plazo, en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la degradación del ambiente con la implementación de energías limpias y la Economía Circular (OECD & FAO, 1999, 2024).

Un ejemplo de la magnitud del impacto que tendrán estas nuevas tecnologías de la Agricultura 5.0, en el corto plazo, es la utilización de datos obtenidos a través de sensores, satélites y drones para monitorizar y gestionar los cultivos con gran exactitud, lo que permitirá un uso más racional y eficiente de los insumos agrícolas. Por su parte, la AGI analizará estos grandes volúmenes de datos en tiempo real, para predecir patrones climáticos, detectar con anticipación las plagas y enfermedades, tomando decisiones precisas sobre cuándo sembrar, regar, desmalezar, fertilizar, cosechar y vender, lo que ayudará a los grandes productores a evolucionar sus métodos y técnicas de producción, necesarios para enfrentar los desafíos futuros (OECD & FAO, 1999, 2024).

Pendientes:

Comparando los informes de las Perspectivas Agrícolas de la OCDE-FAO de 1999 y 2024, se identificaron varios desafíos persistentes que requieren atención continua. A pesar de los avances, la seguridad alimentaria sigue siendo un problema crítico, especialmente en países de bajos ingresos. Los factores socioeconómicos y políticos continúan influyendo negativamente en el acceso y la distribución equitativa de alimentos nutritivos, perpetuando la inseguridad alimentaria (OECD & FAO, 1999, 2024).

Otro tema de preocupación son las emisiones directas de la agricultura, que permanecen altas, subrayando la necesidad urgente de mitigación. Prácticas

agrícolas sostenibles y políticas ambientales más estrictas son esenciales para abordar este problema de manera efectiva (OECD & FAO, 1999, 2024).

Este análisis muestra que, aunque se han logrado progresos significativos en algunos aspectos, persisten desafíos críticos a futuro que requieren atención continua y enfoques innovadores dirigidos a largo plazo. La colaboración internacional, junto con una fuerte inversión en investigación y desarrollo y la implementación de un esquema estratégico de políticas integrales, será crucial para enfrentar estos retos y asegurar un futuro aún más prometedor para el año 2050 (OECD & FAO, 1999, 2024).

2.6 El pasado y presente del Sector Agropecuario de México

2.6.1 Una visión al pasado del campo mexicano

La rica y compleja historia de la agricultura de México es un reflejo de las transformaciones sociales, económicas y políticas que se han implementado a lo largo del tiempo (Uribe-Reyes, 2014; Verín, 2018). El nombre “México” proviene de la palabra náhuatl “*Mēxihco*”, que significa “en el ombligo de la luna” o “en el ombligo del mundo” (Figura 3). México se ubica en el sur de América del Norte y abarca una región con montañas, mesetas, desiertos, selvas tropicales y costas en el Océano Atlántico y Pacífico. Su posición geográfica, entre las latitudes 14° y 32° N y longitudes 86° y 118° O, le otorga una rica variedad de climas y ecosistemas, lo que lo convierte en el quinto país megadiverso del mundo (Badii, 2015; Encyclopædia Britannica, 2024; Jiménez Sierra et al., 2014).

Esta evolución ha sido moldeada por esta diversidad de condiciones locales, además de avances tecnológicos y la globalización. La agricultura sigue siendo la columna vertebral de la economía mexicana y se formó 10 mil años antes de la llegada de los españoles, cuando los pueblos originarios de Mesoamérica se alimentaban e iniciaron el cultivo de maíz, calabaza, maguey, tomate, frijoles, amaranto, quelites, aguacate, chiles, cacao, girasol, vainilla, nopal, camotes,

chía, papaya, jícama, guayaba, entre otra variedad de especies (Dorison, 2022; Mastretta-Yanes et al., 2018, 2019; Verín, 2018; Villa-Islas et al., 2023).



Figura 2-3. Mapa de la ubicación de Mēxihco-Tenochtitlán, ahora Ciudad de México (CDMX). México significa “en el ombligo del mundo”.

Fuente: Encyclopædia Britannica, 2024.

Además de estos cultivos, los mesoamericanos también complementaron su dieta con otros alimentos silvestres y domesticados, como guajolotes, charales, hongos (huitlacoche), perros, venados, conejos, aves, cianobacterias (spirulina), crustáceos (acociles), peces, ranas e insectos (chapulines, jumiles, otros) que proporcionaban una dieta altamente nutritiva en proteínas, vitaminas y minerales (Mastretta-Yanes et al., 2019; Verín, 2018).

Con el paso de los milenios, la diversidad geográfica permitió el desarrollo de esta gran variedad de alimentos, cultivos y técnicas agrícolas adaptadas a los diferentes entornos y el florecimiento de culturas avanzadas y densamente pobladas. La alimentación y la agricultura han dejado una huella distintiva en la economía, la sociedad, la religión y el medio ambiente de México (Jiménez Sierra et al., 2014; Mastretta-Yanes et al., 2019; Verín, 2018).

Los métodos tradicionales de cultivo, como las chinampas, terrazas y el cultivo de temporal dieron paso a tecnologías avanzadas de otros lugares del mundo que se adaptaron por la colonización española, seguido de la globalización tecnológica de la Agricultura 2.0 a la 5.0. Estos nuevos métodos agrícolas han transformado significativamente la producción agrícola y ganadera. Sin embargo, la modernización agrícola también ha traído consigo desafíos, como la degradación del suelo y la necesidad de prácticas agrícolas sostenibles para garantizar la soberanía alimentaria y la conservación del medio ambiente (Ebel, 2020; FAO, 2018; Uribe-Reyes, 2014; Verín, 2018).

La agricultura tradicional y el México precolonial

México se encuentra en una gran parte de lo que se conoce como Mesoamérica: región cultural precolombina y hogar de civilizaciones avanzadas que compartían sistemas y técnicas agrícolas. Por lo que nuestro país es uno de los Centros de Origen y Domesticación de más de 130 especies con potencial alimenticio (Mastretta-Yanes et al., 2019). La milenaria labor de mejoramiento genético que hicieron las civilizaciones de Mesoamérica, en esta diversidad de cultivos y especies nativas, sirvió para alimentar a millones de mexicanos originarios (Figura 4). En la actualidad, muchos de estos cultivos se convirtieron en alimentos básicos y de gran valor económico y nutricional en las dietas de miles de millones de personas, en todo el mundo (Mastretta-Yanes et al., 2019; MNCM, 2021; Verín, 2018).

La agricultura tradicional o Agricultura 1.0 fue la época donde se llevó a cabo esta selección, conservación y mejoramiento genético. La Agricultura 1.0 se caracteriza por ser una agricultura tradicional, con un predominio del trabajo manual, uso de herramientas sencillas y una conexión profunda con su entorno natural. Las civilizaciones prehispánicas, culturas precolombinas (antes de la llegada de los españoles), culturas indígenas o pueblos originarios de Mesoamérica, incluidos los Olmecas, Mayas, Aztecas, Zapotecas, Purépechas, Toltecas, Mixtecas, Totonacas, Huastecas, Mexicas y Tsotsiles desarrollaron algunos de los sistemas agrícolas más avanzados y sostenibles del mundo,

adaptados a los variados climas y suelos de México (Mastretta-Yanes et al., 2019; Pérez-Hernández et al., 2024; Verín, 2018).

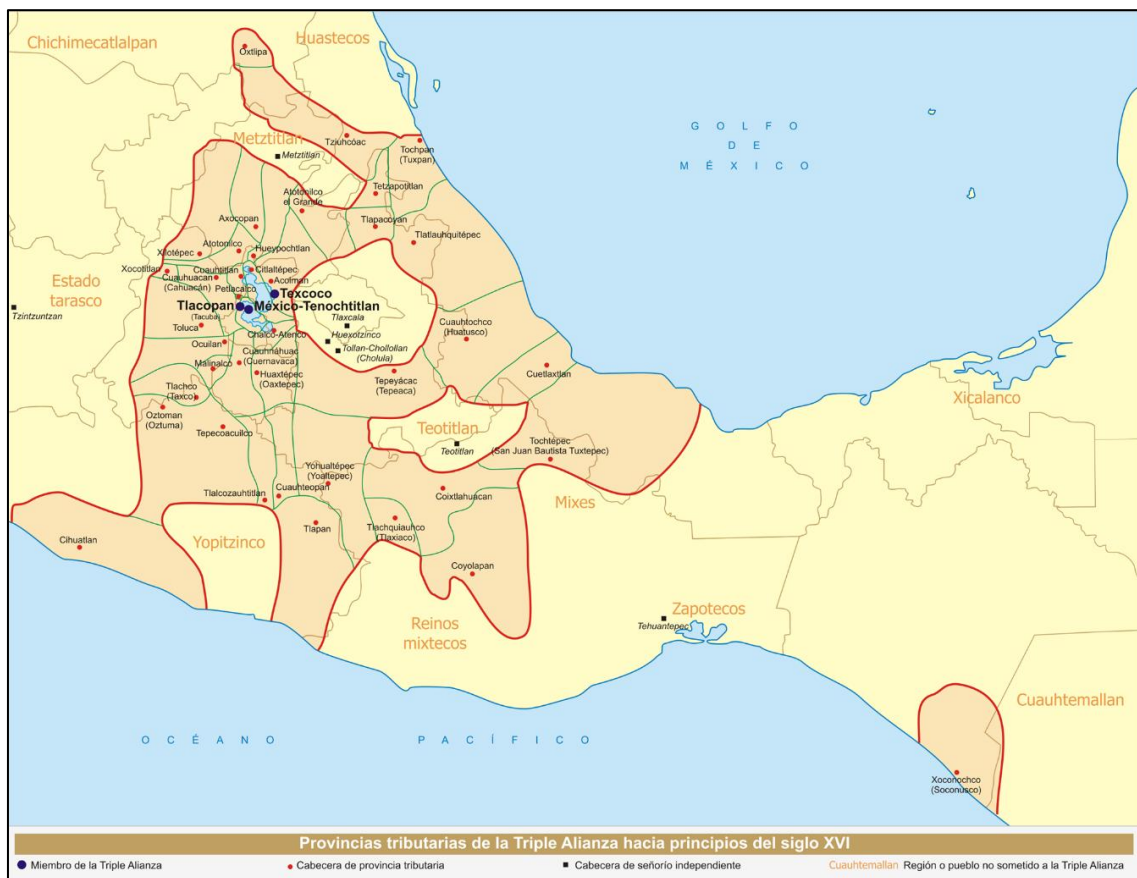


Figura 2-4. Provincias y alcance de la Triple Alianza antes de la llegada de los españoles: Texcoco, Tlacopan y México-Tenochtitlán.

Fuente: MNCM, 2021.

El ejemplo más notable de estos métodos antiguos y sofisticados es el sistema chinampas (Del náhuatl "*chinamitl*" significa "cercado," y "*pan*" significa "sobre" o "en", puede interpretarse como "en el cercado"). Las chinampas son un método de producción agrícola altamente productivo y sostenible donde se producía todo el año, debido a la disponibilidad constante de agua y suelo fértil. Las chinampas son islas artificiales creadas en lagos poco profundos, como el Lago de Xochimilco y el Lago de Texcoco (Ebel, 2020; Hernández, 2024; Rey-Hernández & Bobbink, 2022).

Los Aztecas que, según la tradición son originarios de Aztlán, se establecieron en el Valle de México y, posteriormente, junto a los Mexicas implementaron eficientemente las chinampas, permitiendo sostener su ciudad más emblemática nombrada Tenochtitlán, una de las urbes más grandes del mundo en la época de la conquista española (Johansson & Johansson, 2016; Pereira, 2013; Perez, 2019; Reyes Morales & Romero, 2019). Las chinampas siguen existiendo en el Lago de Xochimilco, donde se producen hortalizas, frutas y plantas ornamentales (Ebel, 2020; Hernández, 2024; Rey-Hernández & Bobbink, 2022).

El sistema milpa (Del náhuatl "*milli*" que significa "parcela cultivada" y "*pan*" que significa "sobre" o "en", así se define como "en la parcela cultivada") es otro ejemplo de la sabiduría agrícola y tradicional de los pueblos milenarios de Mesoamérica, donde se siembran conjuntamente maíz, frijoles, calabaza y, en muchos casos, otros cultivos como chiles, chilacayotes, miltomate, chayotes, agaves, jamaica y plantas silvestres como los quelites: verdolagas, quintoniles, huazontle, quelite cenizo, nabos, romeritos, entre otros. Además, la milpa se caracterizaba por estar rodeada de agaves y frutales como capulines, tejocotes, zapotes y cactus para nopal verdura, tunas dulces, xoconostles, pitayas o pitahayas. La milpa la definieron la cultura, el clima y la geografía (Fonteyne et al., 2023; Franco & Galindo, 2023; Ramírez-Maces et al., 2023).

El sistema milpa es altamente sostenible y eficiente en recursos, ya que maximiza el uso del suelo, abonos, agua, luz y favorece la biodiversidad en flora y fauna. La milpa aseguró y sigue generando una producción constante y variada de alimentos para pequeños y medianos productores de todas las regiones geográficas de México. Además, con este sistema complejo, eficiente y diverso en cultivos y plantas comestibles y de otros usos importantes en la vida de los productores, se redefine la actual idea cerrada en que la milpa es solo la producción de maíz, frijol y calabaza (Fonteyne et al., 2023; Franco & Galindo, 2023; Ramírez-Maces et al., 2023; Sánchez-Velázquez et al., 2023).

Este sistema agrícola tradicional es eficiente para poblaciones pequeñas y arraigadas a la conservación de la naturaleza, lo que permitió que las

comunidades indígenas prosperaran durante milenios. Sin embargo, también requiere mucha mano de obra, es vulnerable al crecimiento de la población y al cambio climático, como sequías o inundaciones extremas (Fonteyne et al., 2023; Franco & Galindo, 2023).

La agricultura colonial dominando la agricultura tradicional en México

Los españoles llegaron al continente Americano en el año de 1519 y en tan solo 2 años los españoles y sus aliados indígenas, liderados por Hernán Cortés de Monroy y Pizarro Altamirano, tomaron Tenochtitlán, el día 13 de agosto de 1521. Este hecho histórico de la humanidad marcó el comienzo de una profunda transformación en la sociedad, idioma, cultura, religión, tecnología, ciencia, alimentación y, sobre todo, en la agricultura de México y del mundo entero. En este período de colonización masiva se introdujeron cultivos, ganado y técnicas agrícolas europeas completamente nuevas, que a menudo se impusieron a las comunidades indígenas a través del sistema de encomiendas, evangelización, educación y explotación (Chávez y Peniche & Hernández Lucas, 2016; Leonard, 1977; Lillo Castañ & Lillo Castañ, 2022; Luis Martínez, 1989).

Bajo estos sistemas agrícolas coloniales, los pueblos indígenas se veían obligados a trabajar para los españoles, en grandes propiedades (haciendas), cultivando especies desconocidas, hasta entonces, por los pueblos originarios, como trigo, cebada, avena, arroz, café, cítricos (limones, naranjas, otros), vegetales (cebolla, ajo, lechuga, zanahorias, otros) caña de azúcar y criando ganado bovino, caprino y ovino para exportación a Europa. También se introdujeron gallinas, caballos, perros, gatos, abejas, burros, mulas y otros (Delsol et al., 2023; Favila, 2012; Ficek, 2019; Martínez et al., 2012).

Este cambio de la agricultura tradicional a la agricultura orientada a la exportación alteró las prácticas agrícolas tradicionales y condujo a la consolidación de la tierra en manos de unos pocos terratenientes extranjeros, que se enriquecieron con los recursos de la Nueva España durante siglos (MacLeod, 2008; McCreery, 1999). La acumulación de tierras y la explotación de los indígenas y campesinos

generaron un profundo descontento social, que, junto con las desigualdades económicas y políticas, culminó primero en la Independencia de México el 16 de septiembre de 1810 (J. M. Cuéllar, 2023; Rosa, 2022) y posteriormente en la Revolución Mexicana el 20 de noviembre de 1910 (Landinez, 2022; Salazar Rebolledo, 2023; Téllez, 2023).

Revolución Verde: globalización y modernización agrícola en México

México se ha transformado significativamente desde la colonización española, la Independencia y la Revolución Mexicana, pasando de una población rural a una urbana y de un modelo de desarrollo hacendario a uno neoliberal y guiado por la globalización. Este enfoque ha llevado a la desigualdad, la degradación de los recursos naturales y las condiciones de vida de los pueblos originarios y campesinos de México, exacerbado por el cambio climático. El equilibrio entre el crecimiento económico, la equidad social y la sostenibilidad es esencial para enfrentar los desafíos futuros (Escalante et al., 2007; Escrig & Frasset, 2024; Zuleta, 2000).

La urbanización aumentó la demanda de servicios, alimentos e infraestructura en las ciudades, mientras que las zonas rurales han enfrentado desafíos como la disminución de la población, desempleo, migración y falta de inversiones (Aguilar Zurita et al., 2018). El modelo económico, la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994 (Rivera de la Rosa & Rivera de la Rosa, 2022) y la renegociación del Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC), que reemplazó al TLCAN en 2018 (Calderón Salazar, 2019), promovieron la apertura de mercados extranjeros, además, generan desigualdades socioeconómicas, dependencia de importaciones y afecta los sistemas de producción tradicionales (Cota et al., 2023; Plata, 2022).

El TLCAN y el T-MEC también impactan considerable el Sector Agropecuario mexicano. La producción de soya, arroz y trigo disminuyó notablemente debido al aumento de las importaciones, lo que reflejó las dinámicas del comercio internacional y las políticas comerciales que favorecen la importación de ciertos

cultivos. Sin embargo, en el caso del maíz amarillo, frijol, sorgo y cebada, las importaciones aumentaron sin afectar la producción nacional, lo que sugiere una capacidad resiliente en estos cultivos que son clave. La importación de maíz amarillo, sorgo y soya se enfoca en la producción de alimentos balanceados, destacando su importancia en la industria ganadera (Brambila et al., 2014; Carvajal-Larenas & Caviedes Cepeda, 2019; J. A. Cuéllar, 2005).

Junto con los mercados internacionales, las políticas y la distribución de los recursos derivados de la Agricultura 3.0 o Revolución Verde, también dan forma al Sector Agropecuario de México. La Agricultura 3.0 se distingue por la investigación y desarrollo, la implementación de paquetes tecnológicos, cultivos genéticamente mejorados, sistemas de riego, esquemas organizacionales eficientes y programas diseñados para estimular la producción en las zonas áridas del norte del país. Los primeros estados beneficiados fueron: Sinaloa, Tamaulipas, Sonora, Baja California y Chihuahua (Cerutti, 2019; Gutiérrez Núñez, 2020).

La Revolución Verde se originó en 1942 con investigaciones en la Escuela Nacional de Agricultura (ahora Universidad Autónoma Chapingo, UACH), financiadas por la Fundación Rockefeller y apoyadas por la Secretaría de Agricultura de México. En 1944, Norman Ernest Borlaug y otros científicos estadounidenses llegaron a México para liderar la implementación de esta primera gran transferencia de tecnología al Sector Agropecuario en la historia moderna. Los esfuerzos colaborativos de investigación revolucionaron las prácticas agrícolas, permitiendo el establecimiento de la Agricultura 3.0 tanto en México como en el resto del mundo. Por estos trabajos colaborativos que realizó Norman Ernest Borlaug en México, se le reconoció con el Premio Nobel de la Paz en 1970 (Cerutti, 2019; Gutiérrez Núñez, 2020).

Las innovaciones agrícolas de la Agricultura 3.0 aumentaron la productividad agrícola en sistemas de monocultivo y mejoraron la seguridad alimentaria de varios países, aunque a menudo a costa de la sostenibilidad ambiental y la equidad social en las comunidades rurales. Esta es la gran diferencia con el

concepto de soberanía alimentaria (Alain, 2017; Crews et al., 2018; Gouttefanjat, 2021). La seguridad alimentaria se centra en cuatro pilares principales: disponibilidad de alimentos, acceso a alimentos, utilización de los alimentos y estabilidad en el tiempo. La seguridad alimentaria puede depender de la importación de alimentos y de la participación en mercados internacionales (FAO et al., 2024).

La soberanía alimentaria, por otro lado, es el derecho de las comunidades rurales y de los pueblos originarios a definir sus estrategias, métodos y técnicas de producción, distribución y consumo de alimentos para toda la población. Se basa en los pequeños y medianos productores. Además, se reconoce la importancia de respetar sus propios conocimientos ancestrales, cultura y tradiciones. Este concepto enfatiza la autosuficiencia y autonomía local/regional, promoviendo la producción sostenible y de autoconsumo, que en general, son los sistemas agrícolas tradicionales, minimizando la dependencia en importaciones (Maldonado & Moreno, 2022; Ramírez-Juárez, 2023; Sánchez-Gómez et al., 2024).

La diversidad de climas y condiciones geográficas y culturales en México ha facilitado el desarrollo de diversos sistemas de producción tradicionales, especialmente en las regiones centro y sur del país (Franco & Galindo, 2023; Verín, 2018). Por lo que, las innovaciones de la Agricultura 3.0 y 4.0 se han centrado en los grandes productores del norte de México, con una agricultura de exportación. La Inteligencia Artificial, Big Data, Internet de las Cosas, plataformas digitales, drones y tractores avanzados, aunque han brindado múltiples oportunidades y beneficios a los grandes productores y la industria (Polymeni et al., 2023), han perpetuado las desigualdades históricas y la vulnerabilidad que las comunidades rurales enfrenta desde la colonización española (Maldonado & Moreno, 2022).

La desigualdad tecnológica disminuye la producción de los pequeños y medianos productores agricultores, debido a la pérdida de los medios de producción, como la tierra, y a la incorporación de la población campesina a la fuerza laboral de

empresas pertenecientes a sectores e industrias dominantes, como la agricultura de exportación del norte del país. A lo largo de varias etapas, el gobierno mexicano ha implementado diversos programas para apoyar la producción agrícola tradicional; sin embargo, su impacto en el volumen de producción ha sido limitado. Esto se debe a la desigual distribución de recursos, falta de infraestructura y competencia directa con los grandes productores y mercados globales (Chávez y Peniche & Hernández Lucas, 2016; Maldonado & Moreno, 2022).

La intervención gubernamental no ha sido suficiente para dar solución a estos y otros desafíos y condiciones socioeconómicas que afectarán a los pequeños y medianos productores en el futuro. Por lo que se destaca la necesidad de políticas públicas más inclusivas y equitativas que involucre a todos los actores clave del Sector Agropecuario de México (Gil-Méndez, 2015; Gutiérrez Núñez, 2020; Uribe-Reyes, 2014).

2.6.2 Situación actual del Sector Agropecuario de México

En el último censo Agropecuario 2022, México contó con un territorio de 196.3 millones de hectáreas (Mha), de las cuales 103.6 Mha (52.7 % del total) se dedican a las siguientes actividades del Sector Agropecuario: 58.1, 29.8 y 15.6 Mha a la ganadería, la agricultura y al aprovechamiento forestal. Se calculó una superficie de 88.1 Mha sin uso agropecuario o forestal (INEGI, 2023).

En contraste con las estadísticas del 2016, se estimó un territorio total para México de 198 Mha, de las cuales 146 Mha se dedicaban a las actividades agropecuarias (73 % del total): 110, 25 y 46 Mha a la ganadería, agricultura y a las áreas forestales. Una disminución importante de 42 millones de hectáreas que pasaron a estar sin uso agropecuario o aprovechamiento forestal (INEGI, 2023). El Producto Interno Bruto (PIB) del Sector Agropecuario de México se estimó en 1.33 billones y su participación en el PIB nacional fue de 4 %. Cerca de 27 millones de personas se dedican y dependen de las actividades agropecuarias (INEGI, 2023; SIAP, 2019).

De éstas, 56 % son agricultores y 44 % trabajadores agrícolas de apoyo (peones o jornaleros). Además, 938 y 162 mil personas se dedican a la cría y explotación de ganado y pesca y acuacultura, respectivamente. De las personas ocupadas, 15 de cada 100 son mujeres. Las entidades de Chiapas, Guerrero, Michoacán, Oaxaca, Puebla y Veracruz concentran 59 % de estos ocupados en el país. De cada 100 trabajadores agrícolas, 24 hablan alguna lengua indígena. En general, ganan en promedio 18.5 pesos por hora laborada. De cada 100 trabajadores agrícolas de apoyo, 66 son remunerados y 34 no reciben ningún ingreso (INEGI, 2016, 2023; SIAP, 2019).

El Sector Agropecuario enfrenta una serie de desafíos modernos, destacándose el aumento de la pobreza entre pequeños y medianos productores. En 2018, aproximadamente 53 millones de personas, equivalentes al 42% de la población nacional, estaban en situación de pobreza, y el 8% en situación de pobreza extrema (CONEVAL, 2019). Esta crisis tiene un impacto social aún mayor cuando el desempleo en el sector incrementa (Aguilar Zurita et al., 2018).

Además, el sector carece de la capacidad productiva necesaria para alcanzar la seguridad y soberanía alimentaria. Un ejemplo de esto es el maíz, uno de los granos básicos en la dieta de la mayoría de los mexicanos y esencial para la alimentación del ganado. México importa grandes cantidades de maíz amarillo para satisfacer la demanda interna, lo que evidencia la dependencia externa y la capacidad del Sector Agropecuario para ser autosuficiente (Araujo Andrade, 2022; Peregrina & López, 2018; Santiago et al., 2022).

En la economía global moderna, se ha observado que tanto los pequeños como los medianos productores agrícolas son considerados como factores residuales en un entorno altamente competitivo y tecnológicamente avanzado de los grandes productores. Los agricultores de pueblos originarios o campesinos, en particular, son a menudo vistos como no competitivos, ya que dependen de la producción de autoconsumo y la venta al por menor para subsistir (FAO et al., 2024; Maldonado & Moreno, 2022).

Desde la perspectiva de una política económica de mercado internacional, su contribución al desarrollo nacional se considera insignificante. Las teorías tradicionales sobre la proletarianización del campesinado, formuladas desde las perspectivas de la economía desarrollista ortodoxa o el marxismo, han dejado de ser opciones viables. Esto se debe a que, desde hace décadas, ha quedado claro que los sectores no agrícolas formales no han generado el empleo suficiente para seguir el modelo clásico de desarrollo económico (FAO, 2017, 2018; Maldonado & Moreno, 2022; Verín, 2018).

La falta de integración efectiva de los pequeños agricultores en la economía global subraya la necesidad de diseñar políticas agrícolas más inclusivas que reconozcan y valoren su papel crucial en la sostenibilidad y diversidad agrícola a futuro. Actualmente, el diseño e implementación de estas políticas están enfocadas en preservar la idea de un desarrollo basado en la modernización, supervisadas por agencias internacionales para garantizar su efectividad y cumplimiento. Sin embargo, los enfoques de desarrollo rural no son universalmente aplicables. Cada región tiene su propia realidad, influenciada por sus tradiciones y contingencias diversa (Gil-Méndez, 2015; Herrera-Tapia et al., 2009; Maldonado & Moreno, 2022).

La estructura agraria y productiva del medio rural mexicano es notablemente heterogénea. Las propiedades ejidales y comunales están principalmente ubicadas en el centro y sur del país, donde residen poblaciones indígenas y mestizas, quienes han contribuido en el desarrollo del sector agroindustrial, migrando estacionalmente a tierras de agricultura comercial en el noreste del país (Gil-Méndez, 2015; Rivera-Núñez, 2024).

Es igualmente importante identificar el impacto que la sociedad ha tenido sobre la naturaleza en los últimos dos siglos, debido al aumento acelerado de la población, el consumo excesivo y los avances científicos-tecnológicos de las Agriculturas 3.0 y 4.0, aplicados sin una conciencia conservacionista a largo plazo. Estos factores han sido causas importantes en el cambio climático global, la desertificación, la pérdida de biodiversidad, la contaminación, entre otros

problemas ambientales. La presión antropogénica sobre los ecosistemas ha alterado significativamente los ciclos naturales y los equilibrios ecológicos, exacerbando la vulnerabilidad de los sistemas biológicos y geofísicos (Guan et al., 2023; Lampridi et al., 2020; Rajesh Kumar K. V., 2024).

Una gran parte del deterioro de los recursos y sistemas naturales en México puede atribuirse a las operaciones realizadas por grandes empresas nacionales e internacionales. Estas actividades han llevado a la explotación intensiva de recursos, lo que ha causado un daño significativo a los ecosistemas locales. Sin embargo, este deterioro ambiental también está profundamente relacionado con las condiciones de pobreza y exclusión social que prevalecen en las zonas rurales. La falta de alternativas económicas y la marginación a la que se enfrentan las comunidades rurales obligan a muchas personas a participar en prácticas insostenibles para sobrevivir (Chávez y Peniche & Hernández Lucas, 2016; Pérez-Hernández et al., 2024; Uribe-Reyes, 2014).

En la actualidad, las organizaciones económicas y financieras tanto nacionales como internacionales están esforzándose para que las empresas, independientemente de su tamaño o tipo, tomen conciencia del grave problema que representa la explotación excesiva de los recursos naturales y el uso desmedido de agroquímicos, que también ponen en riesgo la salud humana y la biodiversidad. Estos esfuerzos tienen como objetivo fundamental alcanzar la sostenibilidad del desarrollo económico a largo plazo (CEPAL et al., 2023; FAO, 2024; FAO et al., 2024; OECD & FAO, 2024).

La crisis provocada por la pandemia del COVID-19 ha generado cambios drásticos en la producción, distribución y consumo de alimentos a nivel global, afectando a gran parte de los mexicanos (Mogues, 2020; Sánchez, 2020). Entre las consecuencias más notables se encuentran la pérdida masiva de empleos y un aumento en los niveles de pobreza, así como una inflación considerable en los precios de la mayoría de los alimentos e insumos (Tosoni & García, 2022). Esta situación ha aumentado la malnutrición, afectando en mayor medida a los pequeños y medianos productores, quienes ya enfrentaban desafíos

estructurales antes de la pandemia. La alteración en las cadenas de suministro ha puesto en evidencia la fragilidad del sistema agrícola tradicional (FAO et al., 2024; Pérez Cruz, 2020).

A pesar de la gravedad de los desafíos presentes y futuros, los esfuerzos para abordarlos han sido limitados e insuficientes. La necesidad de políticas públicas de desarrollo rural que integren la sostenibilidad ambiental y la justicia social se ha vuelto imperativa en el contexto actual del Sector Agropecuario en México. Es esencial, también, fomentar el uso responsable de los recursos naturales y fortalecer las economías locales para reducir la dependencia de prácticas insostenibles, abarcando tanto a pequeños, medianos como grandes productores. Estas políticas deben contribuir en la seguridad y soberanía alimentaria, asegurando un futuro más sostenible y equitativo (Gil-Méndez, 2015; Maldonado & Moreno, 2022; Pérez Cruz, 2020).

2.7 Perspectivas Económicas del Sector Agropecuario de México

2.7.1 El futuro del Sector Agropecuario de México

México, con su rica historia agrícola y su diversidad de ecosistemas, representa un estudio de caso convincente sobre la evolución de las prácticas agropecuarias. Nuestro país ha sido testigo de transformaciones radicales a lo largo de los siglos, que han sido moldeadas por el conocimiento indígena, los legados coloniales (Verín, 2018), los esfuerzos de modernización durante la Revolución Verde (Cerutti, 2019) y las presiones de la globalización tecnológica de la Revolución 5.0. Actualmente, El Sector Agropecuario mexicano se presenta como un caso ejemplar para evaluar los efectos de la nueva Revolución Agrícola Superinteligente a largo plazo (Ahmad & Nabi, 2021).

Estas transformaciones reflejan los cambios en las técnicas agrícolas, las dinámicas socioeconómicas y ambientales del país (Verín, 2018), subrayando la importancia de anticipar las perspectivas económicas del Sector Agropecuario para integrar eficientemente la Inteligencia Artificial General y las diversas

innovaciones tecnológicas con prácticas sostenibles y equitativas. El análisis de estas transformaciones ofrece valiosas lecciones sobre cómo enfrentar los desafíos globales presentes y futuros en la agricultura global, combinando tradición e innovación para un desarrollo rural sostenible (Fountas et al., 2024).

Se prevé que la economía de México mejore después de 2023, aunque no alcanzará los niveles prepandemia, lo que probablemente resultará en un aumento del desempleo, la pobreza y la inflación. Según el Grupo Consultor de Mercados Agrícolas (GCMA, 2022), se estima que México producirá 6.3 millones de toneladas de alimentos, situándose en el noveno lugar a nivel mundial, detrás de China, Estados Unidos, la Unión Europea, India, Brasil, Rusia, Argentina y Ucrania. Esta producción significativa refleja el potencial agrícola de México, pero también subraya los desafíos estructurales que persisten en el país (Fountas et al., 2024; Verín, 2018).

El crecimiento en la producción no necesariamente se traducirá en beneficios equitativos para toda la población, ya que las grandes empresas del norte son las principales beneficiadas, mientras que los pequeños y medianos productores del sur enfrentarán mayores dificultades en la inclusión de los avances tecnológicos de la Agricultura 5.0 (Bissadu et al., 2024; Fountas et al., 2024). Se espera que estas innovaciones de la Agricultura 5.0 permitan producir los alimentos que la población mexicana necesitará hacia el año 2050, buscando mayores rendimientos de los cultivos dominantes y no aumentar nuevas áreas de cultivo (FAO, 2022; ONU, 2023).

Los cultivos de leguminosas y oleaginosas han experimentado una disminución en sus rendimientos debido a que no han recibido la misma atención y desarrollo que los cereales, hortalizas, frutales, forrajes y cultivos industriales (GCMA, 2022; FAO, 2018). La mecanización es un factor importante para aumentar la productividad en los diversos cultivos en México. Sin embargo, medir la eficacia de la maquinaria utilizada presenta desafíos, dados los diferentes tipos de cultivos y las variadas condiciones geográficas del país. La variabilidad climática y del suelo, junto con la disparidad en el acceso a tecnologías avanzadas, ha

impedido una mejora uniforme en todos los tipos de cultivos (Esperante Paramos, 2023; Negrete et al., 2013; Tsench et al., 2023).

Entender el futuro implica comprender el pasado de las empresas. Las empresas buscan maximizar sus beneficios, y la teoría económica utiliza este supuesto para explicar cómo deciden las cantidades de trabajo, capital y materias primas que utilizan en la producción. Además, determina la cantidad óptima de producción a obtener. Esta teoría también permite explicar cómo las decisiones empresariales dependen de los precios de los factores de producción, como el trabajo, el capital y las materias primas, así como de los precios que las empresas pueden fijar para sus productos. Lo que afecta tanto su eficiencia productiva como su competitividad en el mercado (Parkin, 2009; Pindyck & Rubinfeld, 2009).

2.7.2 Métodos para obtener pronósticos en variables clave

En el ámbito de las predicciones económicas, se emplean diversas teorías para alcanzar este propósito. Es factible construir modelos cuantitativos mediante el uso de herramientas estadísticas y econométricas. Un modelo se define como una representación matemática fundamentada en la teoría económica, que puede aplicarse a una variable clave de una empresa, un mercado o cualquier otra entidad económica. La precisión de los pronósticos obtenidos a través de estos modelos se puede evaluar también mediante técnicas estadísticas y econométricas, una actividad que es tan crucial como la generación de los propios pronósticos (Pindyck & Rubinfeld, 2009).

Esta evaluación de precisión permite a los economistas ajustar sus modelos y mejorar la fiabilidad de sus pronósticos, contribuyendo a una toma de decisiones más informada en diversos contextos económicos. Es importante destacar que ningún pronóstico en Economía, ni en ninguna otra ciencia, es completamente preciso o correcto, ya que siempre existe un margen de error. Sin embargo, su relevancia radica en su capacidad para explicar y predecir fenómenos que, de otro modo, serían difíciles de interpretar (Pindyck & Rubinfeld, 2009).

Esto convierte a los modelos econométricos en herramientas esenciales para la Economía. El proceso de validación y refinamiento de estas teorías es crucial para el avance de la Economía como ciencia, permitiendo la evolución continua del conocimiento económico y la mejora en la precisión de los modelos predictivos. Los modelos más conocidos se basan en la teoría de series de tiempo (Makridakis et al., 2022; Pindyck & Rubinfeld, 2009; Rodriguez Paredes et al., 2020).

El análisis de series de tiempo es aplicable en numerosas áreas del conocimiento, incluyendo Economía (Econometría), Matemáticas, Estadística, Ingeniería, Finanzas Públicas, Administración de Empresas y Ciencias Actuariales. Este método permite a los investigadores y profesionales construir modelos que pueden predecir comportamientos futuros basados en datos históricos. Al utilizar herramientas estadísticas avanzadas y técnicas de econometría, estos modelos ayudan a prever tendencias y variaciones en datos temporales, mejorando la precisión y la fiabilidad de las predicciones (Aladag, 2017; Makridakis et al., 2020; Stock, 2015).

La capacidad de pronosticar el futuro es crucial para la planificación organizacional, permitiendo a empresas, instituciones y tomadores de decisiones anticiparse a cambios y preparar estrategias efectivas para enfrentar desafíos futuros. Este enfoque analítico optimiza las operaciones actuales y proporciona una base sólida para el desarrollo de políticas públicas y decisiones estratégicas a largo plazo (Mills, 2019; Stock, 2015; Tian et al., 2024).

En la literatura estadística, se han propuesto y mejorado diversos métodos de predicción de series de tiempo. Los modelos lineales, como los métodos de Box-Jenkins, se han utilizado extensamente, pero presentan limitaciones para capturar ciertos patrones no lineales observados en problemas reales. Para superar estas restricciones, también se han desarrollado modelos no lineales específicos, aunque no son adecuados para modelar otros tipos de no linealidad en series de tiempo (Aladag, 2017; Stock, 2015).

Los modelos no lineales se han complementado con métodos avanzados, lo que permite un análisis más preciso y adaptable a la complejidad de las variables económicas. Estos métodos incluyen redes neuronales artificiales, sistemas difusos de dos factores con algoritmos genéticos, cadenas de Márkov, series de tiempo difusas multivariantes de orden superior, redes neuronales recurrentes y modelos híbridos que combinan varios enfoques. La integración de estos modelos avanzados mejora la capacidad de capturar patrones complejos y no lineales en los datos de las series de tiempo, lo que resulta en predicciones más precisas y robustas (Aladag, 2017; Makridakis et al., 2022).

En los últimos años, las redes neuronales artificiales (RNA), especialmente las Redes Neuronales Recurrentes (RNR) del tipo Long-Short Term Memory (LSTM) de múltiples capas, han demostrado ser herramientas eficaces para la predicción de series temporales en la vida real. Investigaciones teóricas y empíricas en la literatura académica indican que estas RNR-LSTM proporcionan pronósticos más confiables en comparación con los métodos de predicción convencionales (Abbasimehr et al., 2020; Buscema et al., 2018; Lakshmanan et al., 2020).

Esta fiabilidad se debe a su capacidad para capturar patrones complejos y dependencias a largo plazo en los datos. En consecuencia, las redes neuronales profundas se han convertido en uno de los métodos más utilizados para la predicción y modelación de series de tiempo, destacando por su eficiencia en la captura y análisis de fenómenos complejos. La integración de estas tecnologías avanza significativamente la precisión de los pronósticos económicos y científicos, ofreciendo una ventaja competitiva en diversos campos de estudio (Abbasimehr et al., 2020; Greff et al., 2017; Lakshmanan et al., 2020).

Otra característica clave de las RNR-LSTM es que no requieren suposiciones de normalidad y linealidad para funcionar de manera efectiva. Su filosofía central es aprender directamente de los datos la relación subyacente entre las entradas (*inputs*) y las salidas (*outputs*), lo que las diferencia de muchos procesos de modelado estadístico tradicionales que imponen un modelo específico sobre los datos, como los modelos lineales que buscan el "mejor ajuste" que relacione las

variables de entrada y salida según ciertos criterios (Buscema et al., 2018; Greff et al., 2017).

Las RNR-LSTM imponen una arquitectura *a priori*, en lugar de un modelo *a priori*, para el procesamiento de datos. Esta arquitectura es la base a partir de la cual se extrae el modelo que relaciona las entradas (*inputs*) con las salidas (*outputs*). En cualquier proceso que busque establecer esta relación, es crucial tener una representación clara de las relaciones entre los datos. La ventaja de imponer una arquitectura, en lugar de un modelo de datos rígido, radica en la capacidad del modelo para adaptarse a diversas estructuras y patrones dentro de los datos. Esta adaptabilidad permite a las RNR-LSTM capturar de manera más precisa las complejidades y variabilidades inherentes a los datos reales plasmados en las series de tiempo (Abbasimehr et al., 2020; Greff et al., 2017).

Las RNR-LSTM fueron creadas con el objetivo de imitar el sistema neuronal humano. Sin embargo, todavía se consideran modelos muy simples en comparación con el cerebro humano, que es extremadamente complejo y contiene aproximadamente 86 mil millones de neuronas (Figura 5). Aunque las RNR-LSTM no replican exactamente las neuronas biológicas, una red de modelos con un número limitado de neuronas puede proporcionar resultados predictivos satisfactorios para datos del mundo real. Esto no es sorprendente, ya que las RNR-LSTM son modelos no lineales basados en datos (Greff et al., 2017; UNAM-Global, 2019).

Crear un modelo de RNR-LSTM para tareas de pronóstico requiere especificar su arquitectura en términos del número de neuronas de entrada, número de capas ocultas, número de neurona por capa oculta y número de neuronas de salida, una tarea que es crucial pero compleja. La mayoría de las aplicaciones de redes neuronales emplean una sola neurona de salida para la previsión de un paso adelante y de varios pasos. Esta especificación de la arquitectura es fundamental para garantizar la precisión y la eficiencia del modelo predictivo. Un diseño adecuado permite al modelo aprender y generalizar mejor los patrones

presentes en los datos históricos, mejorando la capacidad de pronóstico en aplicaciones prácticas (Abbasimehr et al., 2020; Graves, 2012; Greff et al., 2017).

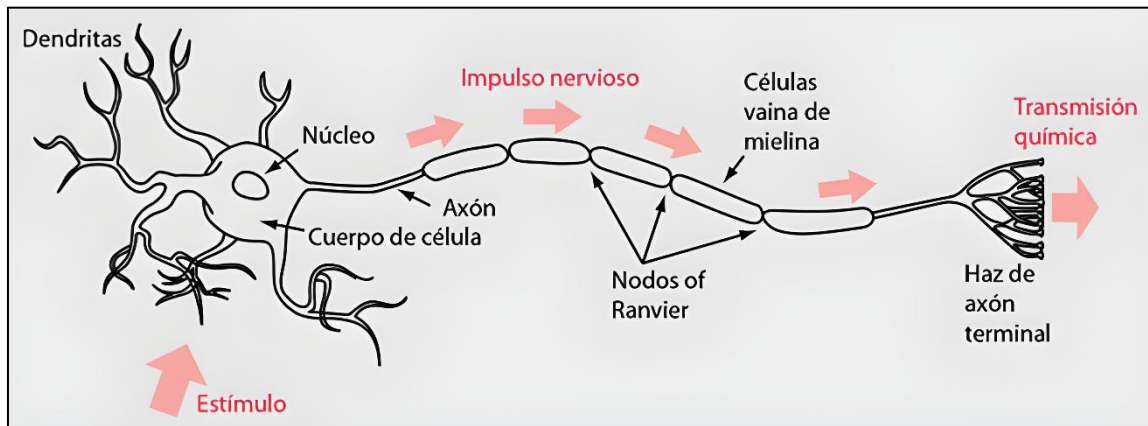


Figura 2-5. Representación de una neurona del cerebro humano y el movimiento que realizan los impulsos nerviosos.

Fuente: UNAM-Global, 2019.

Determinar el diseño óptimo y los parámetros de los pesos en las RNA es una tarea compleja pero esencial para obtener pronósticos eficientes. La optimización de las RNA implica encontrar la arquitectura y los conjuntos de parámetros que maximicen la precisión de las predicciones. Además, es crucial considerar las exigencias computacionales que estos algoritmos requieren para alcanzar resultados exitosos. La optimización computacional asegura que las redes neuronales funcionen de manera eficiente, permitiendo el manejo de grandes volúmenes de datos y complejas tareas de pronóstico en investigación (Erzurum Cicek & Kamisli Ozturk, 2021).

Una forma común de trabajar con redes neuronales profundas y complejas implica la creación de múltiples modelos, cada uno con diferentes números de neuronas, capas y parámetros. Posteriormente, se comparan estos modelos para evaluar su eficiencia en las proyecciones, utilizando indicadores de desempeño específicos (Abbasimehr et al., 2020; Graves, 2012; Greff et al., 2017):

- **Error Cuadrático Medio** (MSE, por sus siglas en inglés, Mean Squared Error): Mide el promedio de los cuadrados de los errores, es decir, las diferencias cuadradas entre los valores predichos y los valores reales.
- **Raíz del Error Cuadrático Medio** (RMSE, por sus siglas en inglés, Root Mean Squared Error): Es la raíz cuadrada del MSE, proporcionando una medida de error en las mismas unidades que los datos.
- **Error Absoluto Medio** (MAE, por sus siglas en inglés, Mean Absolute Error): Mide el promedio de los errores absolutos, es decir, las diferencias absolutas entre los valores predichos y los valores reales.
- **Porcentaje de Error Absoluto Medio** (MAPE, por sus siglas en inglés, Mean Absolute Percentage Error): Calcula el promedio de los errores absolutos en porcentaje.

La comparación de las proyecciones con los datos reales permite observar los valores arrojados por cada modelo. Finalmente, se selecciona el modelo que presenta el menor error posible. Después de elegir la arquitectura y el modelo adecuados, se realizan las proyecciones finales. Este proceso garantiza la optimización del modelo y su capacidad para generar pronósticos precisos (Abbasimehr et al., 2020; Graves, 2012; Greff et al., 2017).

En algunos casos, es necesario utilizar modelos multivariados debido a la influencia de múltiples variables en el análisis de datos. Estos modelos permiten capturar las interacciones entre diferentes variables, proporcionando una comprensión más integral del fenómeno estudiado. No obstante, son más complejos de crear e interpretar. Por eso, generalmente se emplean modelos univariados de series de tiempo para realizar pronósticos o proyecciones, en especial cuando el objetivo es predecir el comportamiento de una única variable a largo plazo. Los modelos univariados son más simples y fáciles de interpretar, lo que los hace ideales para ciertos tipos de análisis donde la complejidad adicional de un modelo multivariado no es necesaria (Mapuwei et al., 2020).

Con los avances en la Inteligencia Artificial General, se espera que las RNA se vuelvan cada vez más complejos y precisos en sus resultados. Las RNA utilizadas en grandes modelos de lenguaje, como ChatGPT, son un ejemplo significativo de estos avances, ya que han demostrado una notable capacidad para manejar y predecir patrones complejos en el procesamiento del lenguaje natural. Estos avances en IA no solo mejorarán los modelos existentes, sino que también contribuirán al desarrollo de la AGI y otras formas de Inteligencia Artificial Avanzada hacia el año 2050. La continua evolución de la IA promete revolucionar diversas áreas, desde la investigación científica hasta la vida cotidiana, proporcionando herramientas más eficientes y precisas (Erzurum Cicek & Kamisli Ozturk, 2021; Lu et al., 2023).

*El futuro de la humanidad, junto a la AGI,
promete ser un lugar mítico, como Aztlán.*

*La gran diferencia es, que nosotros vamos hacia allá...
mientras que los Aztecas, salieron de ahí.*

Javier Medina Hernández, 2024.

2.8 Literatura citada

- Abbasimehr, H., Shabani, M., & Yousefi, M. (2020). An optimized model using LSTM network for demand forecasting. *Computers and Industrial Engineering*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106435>
- Adesiyan, J. S., & Raffington, A. E. (2024). AgriTech Revolution: Next-Generation Supply Chain in America's Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(2), 254–272. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2024/V14I23943>
- Adve, V. S., Wedow, J. M., Ainsworth, E. A., Chowdhary, G., Green-Miller, A., & Tucker, C. (2024). AIFARMS: Artificial intelligence for future agricultural resilience, management, and sustainability. *AI Magazine*, 45(1). <https://doi.org/10.1002/aaai.12152>
- Aguilar Zurita, N., Martínez Prats, G., & Armenta Ramírez, A. B. (2018). *Estudio de la pobreza y desempleo en las zonas metropolitanas del sur sureste mexicano: una revisión documental*. <http://ru.iiec.unam.mx/id/eprint/3928>
- Ahmad, L., & Nabi, F. (2021). *Agriculture 5.0: Artificial Intelligence, IoT and Machine Learning*. CRC Press.
- Akintuyi, O. B. (2024). The Role of Artificial Intelligence in U.S. Agriculture: A Review: Assessing advancements, challenges, and the potential impact on food production and sustainability. *Open Access Research Journal of Engineering and Technology*, 6(2), 023–032. <https://doi.org/10.53022/OARJET.2024.6.2.0017>
- Aladag, C. H. (2017). *Advances in time series forecasting* (Vol. 2). Bentham Science Publishers. <https://doi.org/10.2174/97816810852891170201>
- Alahmad, T., Neményi, M., & Nyéki, A. (2023). Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review. *Agronomy* 2023, Vol. 13, Page 2603, 13(10), 2603. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13102603>
- Alain, H. (2017). CONTROL: the extractive ecology of corn monoculture. *Cultural Studies*, 31(2–3), 232–252. <https://doi.org/10.1080/09502386.2017.1303427>

- Alam, G., Ihsanullah, I., Naushad, M., & Sillanpää, M. (2022). Applications of artificial intelligence in water treatment for optimization and automation of adsorption processes: Recent advances and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 427, 130011. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.130011>
- Aleksey, M., & Sofya, S. (2020). Digitalization and robotization of agriculture in modern China: the main priorities and directions of the state's innovation policy. *Advances in Law Studies*, 8(5), 139–155. <https://doi.org/10.29039/2409-5087-2020-8-5-139-155>
- Alla Korotkikh. (2022). Transforming US Agriculture: Perspective Directions for Development. *Russia and America in the XXI Century*, 6, 0. <https://doi.org/10.18254/S207054760023474-8>
- Almansoori, S. S., & Al-Tahitah, A. N. (2021). The role of artificial intelligence in the decision-making process in the Ministry of Interior in the United Arab Emirates. *Journal of AlMaarif University College*, 32(3), 80–99. <https://doi.org/10.51345/V32I3.451.G237>
- Alqudhaibi, A., Krishna, A., Jagtap, S., Williams, N., Afy-Shararah, M., & Salonitis, K. (2024). Cybersecurity 4.0: safeguarding trust and production in the digital food industry era. *Discover Food*, 4(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/S44187-023-00071-7/FIGURES/12>
- Araujo Andrade, L. A. (2022). Demanda, Oferta Y Precio De Maíz Amarillo En México 2012-2021. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 50(1345-2022–757), 197–208. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.322014>
- Arif, M., & Al Senani, A. M. (2020). Digitalization in Oil and Gas Industry - A Case Study of a Fully Smart Field in United Arab Emirates. *Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2020, ADIP 2020*. <https://doi.org/10.2118/203461-MS>
- Assimakopoulos, F., Vassilakis, C., Margaritis, D., Kotis, K., & Spiliotopoulos, D. (2024). The Implementation of “Smart” Technologies in the Agricultural Sector: A Review. *Information 2024*, Vol. 15, Page 466, 15(8), 466. <https://doi.org/10.3390/INFO15080466>
- Azzulin, M. B., Jazar, M. M., Jedyn, A., & Fernandes, V. (2022). Industrialization and Urbanization: An Intrinsic Relationship in the Global South. *Fronteira:*

Journal of Social, Technological and Environmental Science, 11(3), 202–213. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2022V11I3.P202-213>

Badii, M. H. , A. G. C. E. R. O. L. J. A. & M. A. (2015). Pérdida de Biodiversidad: Causas y Efectos. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(5), 156–174. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/05/biodiversidad.pdf>

Baryshnikova, N., Altukhov, P., Naidenova, N., & Shkryabina, A. (2022). Ensuring Global Food Security: Transforming Approaches in the Context of Agriculture 5.0. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 988(3), 032024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/3/032024>

Bhatt, M. K., Labanya, R., & Joshi, H. C. (2019). Influence of Long-term Chemical fertilizers and Organic Manures on Soil Fertility - A Review. *Universal Journal of Agricultural Research*, 7(5), 177–188. <https://doi.org/10.13189/UJAR.2019.070502>

Bissadu, K. D., Sonko, S., & Hossain, G. (2024). Society 5.0 enabled agriculture: Drivers, enabling technologies, architectures, opportunities, and challenges. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2024.04.003>

Bissadu, K., Hossain, G., & Vajpayee, P. (2024). Agriculture 5.0 Cybersecurity: Monitoring Agricultural Cyber Threats with Digital Twin Technology. *2024 IEEE 5th World AI IoT Congress, AllIoT 2024*, 252–258. <https://doi.org/10.1109/AllIoT61789.2024.10579017>

Bissadu, K., Hossain, G., Velagala, L. P., & Sonko, S. (2024). Analyzing Insider Cyber Threats and Human Factors within the Framework of Agriculture 5.0. *12th International Symposium on Digital Forensics and Security, ISDFS 2024*. <https://doi.org/10.1109/ISDFS60797.2024.10527290>

Brambila, J. de J., Martínez, M. Á., Rojas, M. M., & Pérez, V. (2014). El valor de la producción agrícola y pecuaria en México: fuentes del crecimiento, 1980-2010. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(4). <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/923>

- Branstetter, L., & Li, G. (2022). Does “Made in China 2025” Work for China? Evidence from Chinese Listed Firms. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.4254356>
- Bui, H. T., Aboutorab, H., Mahboubi, A., Gao, Y., Sultan, N. H., Chauhan, A., Parvez, M. Z., Bewong, M., Islam, R., Islam, Z., Camtepe, S. A., Gauravaram, P., Singh, D., Ali Babar, M., & Yan, S. (2024). Agriculture 4.0 and beyond: Evaluating cyber threat intelligence sources and techniques in smart farming ecosystems. *Computers & Security*, 140, 103754. <https://doi.org/10.1016/J.COSE.2024.103754>
- Buscema, P. M., Massini, G., Breda, M., Lodwick, W. A., Newman, F., & Asadi-Zeydabadi, M. (2018). Artificial neural networks. In *Studies in Systems, Decision and Control* (Vol. 131, pp. 11–35). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75049-1_2
- Butu, M., Rodino, S., & Butu, A. (2023). The benefits of introducing digitization in agricultural sectors. *18th International Conference on Environmental Science and Technology*. https://cms.gnest.org/sites/default/files/Proceedings/cest2023_00275/cest2023_00275.pdf
- Calderón Salazar, J. A. (2019). Análisis preliminar de los capítulos de inversión, energía, agricultura, servicios financieros y tipo de cambio en el Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC). *Economía Informa*, 414, 22–43. <http://www.economia.unam.mx/assets/pdfs/econinfo/414/02Analisispreliminardeloscapitulosdeinversion.pdf>
- Carmo, M., García-Ruiz, R., Ferreira, M. I., & Domingos, T. (2017). The N-P-K soil nutrient balance of Portuguese cropland in the 1950s: The transition from organic to chemical fertilization. *Scientific Reports* 2017 7:1, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08118-3>
- Carvajal-Larenas, F. E., & Caviedes Cepeda, G. M. (2019). Análisis comparativo de la eficiencia productiva del maíz en Sudamérica y el mundo en las dos últimas décadas y análisis prospectivo en el corto plazo. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 11(1). <https://doi.org/10.18272/aci.v11i1.1079>
- CEPAL, FAO, & IICA. (2023). *Perspectivas de la Agricultura y del Desarrollo Rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2023-2024*.

<https://www.cepal.org/es/publicaciones/69183-perspectivas-la-agricultura-desarrollo-rural-america-mirada-america-latina>

Cerutti, M. (2019). Trigo y revolución verde en el noroeste de México (1930-1970). *Mundo Agrario*, 20(43), e103–e103. <https://doi.org/10.24215/15155994E103>

Chávez y Peniche, M. L., & Hernández Lucas, M. R. (2016). México, tierra de campesinos. *Andamio*, 93. <https://revistas.inah.gob.mx/index.php/historias/article/download/10911/1678/20851>

Chen, K., Meng, Q., Sun, Y., & Wan, Q. (2024). How does industrial policy experimentation influence innovation performance? A case of Made in China 2025. *Humanities and Social Sciences Communications* 2024 11:1, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02497-x>

Chen, Y., Zeng, T., & Zhang, J. (2023). A new solution and concrete implementation steps for Artificial General Intelligence. <https://arxiv.org/abs/2308.09721v1>

Chu, A. C., & Xu, R. (2024). From Neolithic Revolution to industrialization. *Macroeconomic Dynamics*, 28(3), 699–717. <https://doi.org/10.1017/S1365100523000214>

CONEVAL. (2019). *Diez años de pobreza multidimensional en México: resultados en las entidades federativas*. <https://www.coneval.org.mx/coordinacion/Paginas/principal.aspx>

Cota, M. F. H., Guerra, R. E. M., & Barceló, J. G. A. (2023). Efecto de los tratados comerciales de América del Norte sobre las exportaciones agrícolas de México a Estados Unidos. *Investigación Económica*, 82(324), 126–149. <https://doi.org/10.22201/FE.01851667P.2023.324.83363>

Crews, T. E., Carton, W., & Olsson, L. (2018). Is the future of agriculture perennial? Imperatives and opportunities to reinvent agriculture by shifting from annual monocultures to perennial polycultures. *Global Sustainability*, 1, e11. <https://doi.org/10.1017/SUS.2018.11>

- Cuéllar Álvarez, J. Alberto. (2005). *El efecto del TLCAN sobre las importaciones agropecuarias estadounidenses provenientes de México*. NU. CEPAL. Subse de México. <https://hdl.handle.net/11362/4952>
- Cuéllar, J. M. (2023). Interpretaciones filosóficas de la Independencia de México. *Tópicos, Revista de Filosofía*, 67, 369–407. <https://doi.org/10.21555/TOP.V670.2373>
- Cunbing, G. (2020). Discussion on Application and Development Path of Artificial Intelligence Technology in China Agricultural Field. *Proceedings - 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Education, ICAIE 2020*, 58–62. <https://doi.org/10.1109/ICAIE50891.2020.00021>
- De Agüero, E. G. G., Castañeira-Pérez, N., Herrero-Alonso, D., & Posada, L. R. (2022). Las implicaciones del desarrollo de la agricultura durante la Edad del Hierro en el norte de la península ibérica: el caso de la Peña del Castro (La Ercina, León, España). *Trabajos de Prehistoria*, 79(1), 85–98. <https://doi.org/10.3989/TP.2022.12288>
- Delsol, N., Stucky, B. J., Oswald, J. A., Cobb, C. R., Emery, K. F., & Guralnick, R. (2023). Ancient DNA confirms diverse origins of early post-Columbian cattle in the Americas. *Scientific Reports 2023* 13:1, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39518-3>
- Dey, B., Ferdous, J., & Ahmed, R. (2024). Machine learning based recommendation of agricultural and horticultural crop farming in India under the regime of NPK, soil pH and three climatic variables. *Heliyon*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25112>
- Dorado, H., Delerce, S., Jimenez, D., & Cobos, C. (2018). Finding optimal farming practices to increase crop yield through global-best harmony search and predictive models, a data-driven approach. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11289 LNAI, 15–29. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04497-8_2/COVER/
- Dorison, A. (2022). Ancient Agriculture on Lava Flows: Using LiDAR and Soil Science to Reassess Pre-Hispanic Farming on Malpaís Landforms in West Mexico. *Journal of Ethnobiology*, 42(2), 131–151. <https://doi.org/10.2993/0278-0771->

[42.2.131/ASSET/IMAGES/LARGE/10.2993_0278-0771-42.2.131-FIG5.JPEG](#)

- Dou, F., Ye, J., Yuan, G., Lu, Q., Niu, W., Sun, H., Guan, L., Lu, G., Mai, G., Liu, N., Lu, J., Liu, Z., Wu, Z., Tan, C., Xu, S., Wang, X., Li, G., Chai, L., Li, S., ... Song, W. (2023). *Towards Artificial General Intelligence (AGI) in the Internet of Things (IoT): Opportunities and Challenges*. <https://arxiv.org/abs/2309.07438v1>
- Dwivedi, S. A., Sonawane, V. K., Pandit, T. R., Dwivedi, S. A., Sonawane, V. K., & Pandit, T. R. (2022). Review on the Impact of Insecticides Utilization in Crop Ecosystem: Their Prosperity and Threats. *Insecticides - Impact and Benefits of Its Use for Humanity*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.100385>
- Ebel, R. (2020). Chinampas: An Urban Farming Model of the Aztecs and a Potential Solution for Modern Megalopolis. *HortTechnology*, 30(1), 13–19. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04310-19>
- Emmanuel, K., Ridwanullah, A., Ayomide, A., Funsho, K., Mercy, A., & Stephen, A. (2023). Automation in Agricultural and Biosystems Engineering. *Journal of Engineering Research and Reports*, 25(7), 57–65. <https://doi.org/10.9734/JERR/2023/V25I7938>
- Encyclopædia Britannica, Inc. (2024). *Tenochtitlan | History, Population, Location, Map, & Facts | Britannica*. <https://www.britannica.com/place/Tenochtitlan>
- Erzurum Cicek, Z. I., & Kamisli Ozturk, Z. (2021). Optimizing the artificial neural network parameters using a biased random key genetic algorithm for time series forecasting. *Applied Soft Computing*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107091>
- Escalante, R., Catalán, H., Galindo, L. M., & Reyes, O. (2007). Desagrarización en México: tendencias actuales y retos hacia el futuro. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 4(59), 87–116. <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/desarrolloRural/article/view/1217>
- Escrig, J., & Frasquet, I. (2024). ¿Nuevas miradas sobre viejos temas? La independencia de México en su bicentenario (notas historiográficas).

REVISTA DE HISTORIOGRAFÍA (RevHisto), 39, 123–148.
<https://doi.org/10.20318/RE VHISTO.2024.8808>

Esperante Paramos, B. (2023). La motorización de una agricultura atlántica y ganadera de pequeños propietarios: La difusión de tractores agrícolas en Galicia, 1939-2000. *Historia Agraria: Revista de Agricultura e Historia Rural*, ISSN 1139-1472, Nº 90, 2023, Págs. 163-192, 90, 163–192.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9069436&info=resumen&idioma=ENG>

FAO. (2009). La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. In *Fao* (p. 4).
[https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers SP/La agricultura mundial.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf)

FAO. (2017). The future of food and agriculture: Trends and challenges. In *El futuro de la agricultura y la alimentación* (Vol. 1, Issue 1).
<https://openknowledge.fao.org/items/ede32306-aeec-4891-9fe6-7e4f2fd93143>

FAO. (2018). *The future of food and agriculture - Alternative pathways to 2050*.
<https://www.fao.org/global-perspectives-studies/fofa>

FAO. (2022). The Future of food and agriculture - Drivers and triggers for transformation. In *The Future of Food and Agriculture*, no. 3. FAO Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cc0959en>

FAO. (2023). *Repercusiones de los desastres en la agricultura y la seguridad alimentaria 2023: Evitar y reducir las pérdidas mediante la inversión en la resiliencia*. <https://doi.org/10.4060/cc7900en>

FAO. (2024). *El estado de los bosques del mundo 2024: Innovaciones en el sector forestal para lograr un futuro más sostenible*.
<https://doi.org/10.4060/cd1211es>

FAO, IFAD, WHO, WFP, & UNICEF. (2024). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2024*. <https://doi.org/10.4060/cd1254es>

Favila, M. E. (2012). Historical, biogeographical and ecological factors explain the success of some native dung beetles after the introduction of Cattle in Mexico. *Pastos*, 42(2), 161–181.
<https://polired.upm.es/index.php/pastos/article/view/2248>

- Ficek, R. E. (2019). Cattle, capital, colonization: Tracking creatures of the anthropocene in and out of human projects. *Current Anthropology*, 60(S20), S260–S271. https://doi.org/10.1086/702788/ASSET/IMAGES/LARGE/FG1_ONLINE.JPEG
- Fonteyne, S., Castillo Caamal, J. B., Lopez-Ridaura, S., Van Loon, J., Espidio Balbuena, J., Osorio Alcalá, L., Martínez Hernández, F., Odjo, S., & Verhulst, N. (2023). Review of agronomic research on the milpa, the traditional polyculture system of Mesoamerica. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1115490. <https://doi.org/10.3389/FAGRO.2023.1115490/BIBTEX>
- Fountas, S., Espejo-Garcia, B., Kasimati, A., Gemtou, M., Panoutsopoulos, H., & Anastasiou, E. (2024). Agriculture 5.0: Cutting-Edge Technologies, Trends, and Challenges. *IT Professional*, 26(1), 40–47. <https://doi.org/10.1109/MITP.2024.3358972>
- Fragomeli, R., Annunziata, A., & Punzo, G. (2024). Promoting the Transition towards Agriculture 4.0: A Systematic Literature Review on Drivers and Barriers. *Sustainability (Switzerland)*, 16(6), 2425. <https://doi.org/10.3390/SU16062425/S1>
- Franco, A. G., & Galindo, A. A. G. (2023). La milpa y la alimentación en México. *Educación Química*, 34, 108–116. <https://doi.org/10.22201/FQ.18708404E.2023.4.86339E>
- Furholt, M. (2021). Mobility and Social Change: Understanding the European Neolithic Period after the Archaeogenetic Revolution. *Journal of Archaeological Research* 2021 29:4, 29(4), 481–535. <https://doi.org/10.1007/S10814-020-09153-X>
- GCMA. (2022). *Perspectivas Agroalimentarias* 2022. <https://gcma.com.mx/descargas/perspectivas-agroalimentarias-2022/>
- GCMA. (2024). *Perspectivas Agroalimentarias* 2024. <https://gcma.com.mx/descargas/perspectivas-agroalimentarias-2024/>
- Gil-Méndez, J. (2015). Neoliberalismo, políticas agrarias y migración. Consecuencias de un modelo contra los productores. *Ra Ximhai*, 11(2), 145–162. <https://raximhai.uaim.edu.mx/index.php/rx/article/view/555>

- Goodell, J. W. (2020). COVID-19 and finance: Agendas for future research. *Finance Research Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2020.101512>
- Gouttefanjat, F. (2021). Revolución Verde, neoliberalismo y transgénicos en México: hacia una subordinación del maíz al capital. [Green Revolution, neoliberalism and transgenic crops in Mexico: towards a subordination of corn to capital]. *Forhum International Journal of Social Sciences and Humanities*, 3(4), 108–119. <https://doi.org/10.35766/J.FORHUM2021.04.03.9>
- Graves, A. (2012). *Supervised sequence labelling with Recurrent Neural Networks* (1st ed.). Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-24797-2>
- Greff, K., Srivastava, R. K., Koutník, J., Steunebrink, B. R., & Schmidhuber, J. (2017). LSTM: A search space odyssey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 28(10), 2222–2232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582924>
- Guan, N., Liu, L., Dong, K., Xie, M., & Du, Y. (2023). Agricultural mechanization, large-scale operation and agricultural carbon emissions. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2238430>
- Gutiérrez Núñez, N. L. (2020). Revolución verde en los suelos agrícolas de México. Ciencia, políticas públicas y agricultura del maíz, 1943-1961. *Mundo Agrario*, 21(47), e142–e142. <https://doi.org/10.24215/15155994E142>
- Gyamfi, E. K., Elsayed, Z., Kropczynski, J., Yakubu, M. A., & Elsayed, N. (2024). Agricultural 4.0 Leveraging on Technological Solutions: Study for Smart Farming Sector. *2024 IEEE 3rd International Conference on Computing and Machine Intelligence, ICMI 2024 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICMI60790.2024.10585910>
- H. Afshar, M., Hassani, A., Aminzadeh, M., Borrelli, P., Panagos, P., Robinson, D. A., & Shokri, N. (2024). *AI-driven insights into soil health and soil degradation in Europe in the face of climate and anthropogenic challenges*. <https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU24-9512>
- Haloui, D., Oufaska, K., Oudani, M., & El Yassini, K. (2024). Bridging Industry 5.0 and Agriculture 5.0: Historical Perspectives, Opportunities, and Future

Perspectives. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 3507, 16(9), 3507.
<https://doi.org/10.3390/SU16093507>

Hassoun, A., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G., Duong, L. N. K., Saxena, P., Bouzembrak, Y., Treiblmaier, H., Para-López, C., Carmona-Torres, C., Dev, K., Mhlanga, D., & Aït-Kaddour, A. (2024). From Food Industry 4.0 to Food Industry 5.0: Identifying technological enablers and potential future applications in the food sector. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(6), e370040.
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.70040>

Hernández, J. P. (2024). Sostenibilidad Socioecológica de las Chinampas de Xochimilco: Integración de Factores Humanos y Naturales Hacia el Equilibrio Ambiental. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(2), 8059–8080. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V8I2.11242

Herrera-Tapia, F., Lutz-Bachère, B., & Vizcarra-Bordi, I. (2009). La política de desarrollo rural en México y el cambio institucional 2000-2006. *Economía, Sociedad y Territorio*, 9(29), 89–117.
<https://doi.org/https://doi.org/10.22136/est002009188>

Holzinger, A., Fister, I., Fister, I., Kaul, H. P., & Asseng, S. (2024). Human-Centered AI in Smart Farming: Toward Agriculture 5.0. *IEEE Access*, 12, 62199–62214. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3395532>

Hu, W., Xu, C., Duan, Y., & Zhao, W. (2022). Discussion on the Impact of Artificial Intelligence to China's Economy: - From the Perspective of Theoretical Mechanism, Industrial Structure and so on. *Proceedings - 2022 2nd Asia Conference on Information Engineering, ACIE 2022*, 107–110.
<https://doi.org/10.1109/ACIE55485.2022.00030>

Huo, D., Malik, A. W., Ravana, S. D., Rahman, A. U., & Ahmedy, I. (2024). Mapping smart farming: Addressing agricultural challenges in data-driven era. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113858.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.113858>

INEGI. (2016). "Estadísticas a propósito del día del trabajador agrícola: Datos nacionales."
https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2021/EAP_Trabajo21.pdf

- INEGI. (2023). *Resultados Definitivos del Censo Agropecuario 2022*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/CA_Def/CA_Def2022.pdf
- Innan, N., & Khan, M. A.-Z. (2023). *Classical-to-Quantum Sequence Encoding in Genomics*. <https://arxiv.org/abs/2304.10786v1>
- Iqbal, S., Riaz, U., Murtaza, G., Jamil, M., Ahmed, M., Hussain, A., & Abbas, Z. (2021). Chemical Fertilizers, Formulation, and Their Influence on Soil Health. *Microbiota and Biofertilizers: A Sustainable Continuum for Plant and Soil Health*, 1–15. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48771-3_1
- Iram, S., Dolson, E., Chiel, J., Pelesko, J., Krishnan, N., Güngör, Ö., Kuznets-Speck, B., Deffner, S., Ilker, E., Scott, J. G., & Hinczewski, M. (2019). Controlling the speed and trajectory of evolution with counterdiabatic driving. *Nature Physics*, 17(1), 135–142. <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0989-3>
- Jha, N., Prashar, D., & Nagpal, A. (2021). Combining Artificial Intelligence with Robotic Process Automation—An Intelligent Automation Approach. *Studies in Computational Intelligence*, 945, 245–264. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65661-4_12
- Ji, Y. (2023). Suggestions for the Development of Smart Agriculture in China. *Frontiers in Sustainable Development*, 3(7), 31–35. <https://doi.org/10.54691/FSD.V3I7.5328>
- Jiménez Sierra, C. L., Sosa Ramírez, J., Cortés Calva, P., Solís Cámara, A. B., Íñiguez Dávalos, L. I., & Ortega Rubio, A. (2014). México país megadiverso y la relevancia de las áreas naturales protegidas. *Investigación y Ciencia - Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 60, 16–22. <https://investigacion.uaa.mx/RevistalyC/archivo/revista60/Articulo%202.pdf>
- Johansson, P., & Johansson, P.-0002-3161-8765. (2016). La imagen de Aztlan en el Códice Boturini. *Estudios de Cultura Náhuatl*, v. 51, 2016., 57–79. <https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>
- Johnson, D., Alsharid, M., El-Bouri, R., Mehdi, N., Shamout, F., Szenicer, A., Toman, D., & Binghalib, S. (2022). An Experience Report of Executive-Level Artificial Intelligence Education in the United Arab Emirates.

- Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 36(11), 12766–12773. <https://doi.org/10.1609/AAAI.V36I11.21555>
- Kato, J., Kitakufe, D., & Muhindo, J. (2024). The convergence of the fourth industrial revolution and mixed reality: Transforming agricultural economics in developing nations and retail experiences in the U.S. *Https://Wjarr.Com/Sites/Default/Files/WJARR-2024-2900.Pdf*, 23(3), 2267–2280. <https://doi.org/10.30574/WJARR.2024.23.3.2900>
- Khan, A., Imam, A., & Azam, A. (2021). Role of Artificial Intelligence in Defence Strategy: Implications for Global and National Security. *Strategic Studies*, 41(1), 19–40. <https://doi.org/10.53532/SS.041.01.0058>
- Khan, B. A., Nadeem, M. A., Nawaz, H., Amin, M. M., Abbasi, G. H., Nadeem, M., Ali, M., Ameen, M., Javaid, M. M., Maqbool, R., Ikram, M., & Ayub, M. A. (2023). *Pesticides: Impacts on Agriculture Productivity, Environment, and Management Strategies*. 109–134. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22269-6_5
- Kimhi, A. (2024). Food Security in Israel: Challenges and Policies. *Foods 2024*, Vol. 13, Page 187, 13(2), 187. <https://doi.org/10.3390/FOODS13020187>
- Lakshmanan, B., Vivek Raja, P. S. N., & Kalathiappan, V. (2020). Sales Demand Forecasting Using LSTM Network. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1056. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0199-9_11
- Lampridi, M., Kateris, D., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. (2020). Energy Footprint of Mechanized Agricultural Operations. *Energies 2020*, Vol. 13, Page 769, 13(3), 769. <https://doi.org/10.3390/EN13030769>
- Landinez, D. (2022). El uso político de la historia. Una aproximación al discurso de la Revolución mexicana. *Polisemia*, 18(34), 30–47. <https://doi.org/10.26620/UNIMINUTO.POLISEMIA.18.34.2022.30-47>
- Larsen, C. S., Knüsel, C. J., Haddow, S. D., Pilloud, M. A., Milella, M., Sadvari, J. W., Pearson, J., Ruff, C. B., Garofalo, E. M., Bocaeye, E., Betz, B. J., Dori, I., & Glencross, B. (2019). Bioarchaeology of Neolithic Çatalhöyük reveals fundamental transitions in health, mobility, and lifestyle in early farmers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(26), 12615–12623. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1904345116/ASSET/849B9697-A5AA->

[4BBE-B8AF-C7EC61DAED31/ASSETS/GRAPHIC/PNAS.1904345116FIG03.JPEG](#)

- Lebid, O. V., Kiporenko, S. S., & Vovk, V. Yu. (2023). Use of Artificial Intelligence Technologies in Agriculture: European Experience and Application in Ukraine. *Elektronnoe Modelirovanie*, 45(3), 57–71. <https://doi.org/10.15407/EMODEL.45.03.057>
- Leonard, I. A. (1977). La educación como conquista: Empresa franciscana en México. *Hispanic American Historical Review*, 57(2), 334–335. <https://doi.org/10.1215/00182168-57.2.334>
- Lillo Castañ, V., & Lillo Castañ, V. (2022). Una utopía para el Nuevo Mundo: Vasco de Quiroga y su traducción de la Utopía de Tomás Moro. *Historia Mexicana*, 72(2), 615–644. <https://doi.org/10.24201/HM.V72I2.4505>
- Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2021). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4322–4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
- López-Torres, B. J., Rendón-Medel, R., & Camacho Villa, T. C. (2016). La comercialización de los maíces de especialidad en México: condiciones actuales y perspectivas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i15.427>
- Lu, G., Li, S., Mai, G., Sun, J., Zhu, D., Chai, L., Sun, H., Wang, X., Dai, H., Liu, N., Xu, R., Petti, D., Li, C., Liu, T., & Li, C. (2023). *AGI for Agriculture*. <https://arxiv.org/abs/2304.06136v1>
- Luis Martínez, J. (1989). Las crónicas de la conquista de México (un resumen). *Historia Mexicana*, 38(4), 677–699. <https://www.jstor.org/stable/25138250>
- MacLeod, M. J. (2008). *Spanish Central America: A Socioeconomic History, 1520-1720* Murdo J. MacLeod. University of Texas Press. <https://www.jstor.org/stable/10.7560/717893>
- Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. (2020). The M4 Competition: 100,000 time series and 61 forecasting methods. *International Journal of Forecasting*, 36(1), 54–74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.04.014>

- Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. (2022). M5 accuracy competition: Results, findings, and conclusions. *International Journal of Forecasting*, 38(4), 1346–1364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.11.013>
- Maldonado, L. K., & Moreno, G. H. (2022). Carencia alimentaria, cadenas productivas y políticas públicas para el sector agrícola en México. *Economía, Población y Desarrollo*, 12(67). <https://doi.org/10.20983/epd.2022.67.1>
- Mapuwei, T. W., Bodhlyera, O., & Mwambi, H. (2020). Univariate Time Series Analysis of Short-Term Forecasting Horizons Using Artificial Neural Networks: The Case of Public Ambulance Emergency Preparedness. *Journal of Applied Mathematics*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/2408698>
- Maraveas, C., Konar, D., Michopoulos, D. K., Arvanitis, K. G., & Peppas, K. P. (2024). Harnessing quantum computing for smart agriculture: Empowering sustainable crop management and yield optimization. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, 108680. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2024.108680>
- Marinoudi, V., Benos, L., Camacho Villa, C., Lampridi, M., Kateris, D., Berruto, R., Pearson, S., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. (2024). Adapting to the Agricultural Labor Market Shaped by Robotization. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 7061, 16(16), 7061. <https://doi.org/10.3390/SU16167061>
- Martínez, A. M., Gama, L. T., Cañón, J., Ginja, C., Delgado, J. V., Dunner, S., Landi, V., Martín-Burriel, I., Penedo, M. C. T., Rodellar, C., Vega-Pla, J. L., Acosta, A., Álvarez, L. A., Camacho, E., Cortés, O., Marques, J. R., Martínez, R., Martínez, R. D., Melucci, L., ... Zaragoza, P. (2012). Genetic Footprints of Iberian Cattle in America 500 Years after the Arrival of Columbus. *PLOS ONE*, 7(11), e49066. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0049066>
- Martínez-Vásquez, E., & Vázquez-García, V. (2019). Impacto de la expansión de soya transgénica en la producción de maíz y miel en Campeche, México. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 26, 173–190. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.26.2019.3840>

- Martos, V., Ahmad, A., Cartujo, P., & Ordoñez, J. (2021). Ensuring agricultural sustainability through remote sensing in the era of agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11(13), 5911. <https://doi.org/10.3390/app11135911>
- Mastretta-Yanes, A., Acevedo Gasman, F., Burgeff, C., Cano Ramírez, M., Piñero, D., & Sarukhán, J. (2018). An initiative for the study and use of genetic diversity of domesticated plants and their wild relatives. *Frontiers in Plant Science*, 9, 300384. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2018.00209/BIBTEX>
- Mastretta-Yanes, A., Bellon, M. R., Acevedo, F., Burgeff, C., Piñero, D., & Sarukhán, J. (2019). Un programa para México de conservación y uso de la diversidad genética de las plantas domesticadas y sus parientes silvestres. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(4), 321–321. <https://doi.org/10.35196/RFM.2019.4.321>
- Mccreery, D. (1999). The Second Conquest of Latin America: Coffee, Henequen, and Oil during the Export Boom, 1850-1930. *Hispanic American Historical Review*, 79(4), 760–761. <https://doi.org/10.1215/00182168-79.4.760>
- McNeal, A. (2022). The Process of Urbanization and Modernization that is Evolving Manchester, United Kingdom. *History and Political Science | History 3003 - The Globe*. <https://doi.org/https://doi.org/10.33015/dominican.edu/2022.HIST.3003.01>
- Mills, T. C. (2019). *Applied time series analysis: A practical guide to modeling and forecasting* (Elsevier, Ed.; 1st ed.). Academic press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03956-6>
- Mishra, N., Hangshing, L., Kadam, D. S., Tapang, T., & S, S. (2024). Advances in Vertical Farming: Opportunities and Challenges. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(8), 212–222. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2024/V30I82241>
- MNCM. (2021, September). *Provincias tributarias de la Triple Alianza hacia principios del siglo XVI*. Museo Nacional de Las Culturas Del Mundo. https://www.museodelasculturas.mx/wp-content/uploads/2021/09/240902634_2966556013566002_24434382673_77575315_n.png

- Mogues, T. (2020). Los mercados de alimentos durante la COVID-19. *International Fund Monetary. Fiscal Affairs*. <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/covid19-special-notes/Spanish/sp-special-series-on-covid-19-food-markets-during-covid-19.ashx>
- Mukhamedieva, D. T., & Sobirov, R. A. (2024). Application of quantum computing in image processing for recognition of infectious diseases of wheat. *BIO Web of Conferences*, 95, 01003. <https://doi.org/10.1051/BIOCONF/20249501003>
- Munnisunker, S., Nel, L., & Diederichs, D. (2022). The Impact of Artificial Intelligence on Agricultural Labour in Europe. *Journal of Agricultural Informatics*, 13(1). <https://doi.org/10.17700/JAI.2022.13.1.638>
- Navdeep, S., & Shallu, B. (2024). Navigating GDPR Compliance: The Intersection of Data Governance, Accountability, and Organizational Culture. *IJIRMPs - International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences*, 12(4). <https://doi.org/10.37082/IJIRMPs.V12.I4.230875>
- Nawaz, F., Abu Saleem, K., & Kayani, U. (2024). The Made in China 2025 strategy: Perceptions and reservations of China's state capitalist economic model. *Corporate and Business Strategy Review*, 5(1, special issue), 432. <https://doi.org/10.22495/CBSRV5I1SIART16>
- Negrete, J. C., Lilles Tavares Machado, A., & Lilles Tavares Machado, R. (2013). Parque de tractores agrícolas en México: estimación y proyección de la demanda. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(3), 61–69. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v22n3/rcta11313.pdf>
- Negri-Ribalta, C., Lombard-Platet, M., & Salinesi, C. (2024). Understanding the GDPR from a requirements engineering perspective—a systematic mapping study on regulatory data protection requirements. *Requirements Engineering*, 1–27. <https://doi.org/10.1007/S00766-024-00423-4/TABLES/16>
- Nikolaevich, C. N., Aleksandrovna, Y. E., & Matveevich, F. V. (2024). On the issue of reducing the number of emergencies in the technological systems of agro-industrial complexes. *MOSCOW ECONOMIC JOURNAL*, 9(5), 365–376. https://doi.org/10.55186/2413046X_2024_9_5_255

- Obaid, M. K., Alazzai, W. K., Abood, B. S. Z., & Al-Farouni, M. (2024). Sustainable Agriculture Practices: AI and IoT's Vital Contribution. *E3S Web of Conferences*, 491. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449101025>
- OECD, & FAO. (1999). *OECD-FAO Agricultural Outlook 1999* (OECD-FAO Agricultural Outlook). OECD. https://doi.org/10.1787/AGR_OUTLOOK-1999-EN
- OECD, & FAO. (2024). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033* (OECD-FAO Agricultural Outlook). OECD. <https://doi.org/10.1787/4c5d2cfb-en>
- ONU. (2018). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL. In *Publicación de las Naciones Unidas*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>
- ONU. (2023). *World Population Prospects 2022*. <https://population.un.org/wpp/>
- Orlova, N. V., & Nikolaev, D. V. (2022). Russian agricultural innovations prospects in the context of global challenges: Agriculture 4.0. *Russian Journal of Economics* 8(1): 29-48, 8(1), 29-48. <https://doi.org/10.32609/J.RUJE.8.78430>
- Osumanu, I. K., & Kosoe, E. A. (2023). *Global Biodiversity Decline and Loss from Agricultural Intensification Through Agrochemical Application*. 77-103. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3439-3_3
- Parkin, M. (2009). *Economía* (8th ed.). Pearson Educación.
- Paul, von A. T. (2023). Wie revolutionär war die „neolithische Revolution“? *Historische Anthropologie*, 31(2), 211-241. <https://doi.org/10.7788/HIAN.2023.31.2.211>
- Peregrina, L. H. R., & López, J. B. (2018). La producción de maíz en México. ¿Seguridad o dependencia alimentaria? *Revista Conjeturas Sociológicas*, 93-115. <https://revistas.ues.edu.sv/index.php/conjsociologicas/article/view/1459>

- Pereira, G., Michelet, D., & Migeon, G. (2013). La migración de los Purépecha hacia el norte y su regreso a los lagos. *Arqueología Mexicana*, 21(123), 55–60. <http://raices.com.mx/tienda/revistas-michoacan-AM123>
- Pérez Cruz, O. A. (2020). La Competitividad y la seguridad alimentaria en México. *Economía Coyuntural*, 5(1), 119–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.3746608>
- Perez, O. G. (2019). Imaginario occidental y retórica: Los orígenes de los aztecas-mexicas en la Crónica Mexicáyotl. *Horizonte Histórico - Revista Semestral de Los Estudiantes de La Licenciatura En Historia de La UAA*, 18, 48–62. <https://doi.org/10.33064/HH.VI18.2102>
- Pérez-Hernández, C., Hernández, L. L., García, A. G., & Rangel, M. I. P. (2024). La gobernanza en la gestión comunitaria del agua en Zinacantán, Chiapas, México. *Sociedad y Ambiente*, 27, 1–28. <https://doi.org/10.31840/SYA.V2024I27.2880>
- Pindyck, R. S., & Rubinfeld, D. L. (2009). *Microeconomía* (7ma ed.). Pearson Educación, S. A.
- Plata, A. M. R. (2022). La geopolítica del libre comercio: impacto de la guerra comercial entre China y Estados Unidos en la renegociación del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN). *Revista Peruana de Derecho Internacional*, 72(170), 101–119. <https://doi.org/10.38180/RPDI.V0I170.266>
- Polymeni, S., Plastras, S., Skoutas, D. N., Kormentzas, G., & Skianis, C. (2023). The Impact of 6G-IoT Technologies on the Development of Agriculture 5.0: A Review. *Electronics* 2023, Vol. 12, Page 2651, 12(12), 2651. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS12122651>
- Prathapachandran, N., & Devadas, V. (2023). Sustainable and Traditional Agricultural Practices to Reinforce Income Dynamics Among Tribal Communities in Rural Wayanad, Kerala, India. *Agricultural & Rural Studies*, 1(3), 0017–0017. <https://doi.org/10.59978/AR01030017>
- Rabhi, L., Jabir, B., Falih, N., Afraites, L., & Bouikhalene, B. (2023). A Connected farm Metamodeling Using Advanced Information Technologies for an Agriculture 4.0. *Agris On-Line Papers in Economics and Informatics*, 2(June), 93–104. <https://doi.org/10.7160/AOL.2023.150208>

- Raevskaya, E. G. (2024). Introducing artificial intelligence in Chinese agriculture (review). *Аграрная Наука Евро-Северо-Востока*, 25(5), 739–753. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.5.739-753>
- Ragazou, K., Garefalakis, A., Zafeiriou, E., & Passas, I. (2022). Agriculture 5.0: A New Strategic Management Mode for a Cut Cost and an Energy Efficient Agriculture Sector. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 3113, 15(9), 3113. <https://doi.org/10.3390/EN15093113>
- Rajesh Kumar K. V., H. K. D. S. P. A. K. B. K. P. (2024). *Sustainable Solutions for E-Waste and Development*. IGI Global. <https://doi.org/https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1018-2>
- Raji, E., Ijomah, T. I., & Eyieyien, O. G. (2024). Improving agricultural practices and productivity through extension services and innovative training programs. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, 6(7), 1297–1309. <https://doi.org/10.51594/IJARSS.V6I7.1267>
- Rakhra, M., Deb, P., Dahiya, O., Chandel, S. S., Bhutta, B., Badotra, S., Kumar, S., Shaukat, A., & Singh, D. (2022). An Analytical Study of the Types of Implements used by Farmers in Mechanized Agriculture. 2022 *International Mobile and Embedded Technology Conference, MECON 2022*, 683–687. <https://doi.org/10.1109/MECON53876.2022.9751983>
- Ramírez-Juárez, J. (2023). Régimen alimentario y agricultura familiar. Elementos para la soberanía alimentaria. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(29), e3533–e3533. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V14I29.3533>
- Ramírez-Maces, H. O., Tadeo-Robledo, M., Villegas-Aparicio, Y., Aragón-Cuevas, F., Martínez-Gutiérrez, A., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Espinosa-Calderón, A., & de la O Olán, M. (2023). Diversidad biológica del sistema milpa y su papel en la seguridad alimentaria en la Sierra Mixe, Oaxaca. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(2), 105–105. <https://doi.org/10.35196/RFM.2023.2.105>
- Rashid, A. Prof. Dr. E. M. (2023). The digital reality of the United Arab Emirates in light of technological and informational developments. *Economic and Administrative Studies Journal*, 2(2), 1–15. <https://doi.org/10.58564/EASJ/2.2.2023.1>

- Rehman, A. U., Alamoudi, Y., Khalid, H. M., Morchid, A., Muyeen, S. M., & Abdelaziz, A. Y. (2024). Smart agriculture technology: An integrated framework of renewable energy resources, IoT-based energy management, and precision robotics. *Cleaner Energy Systems*, 9, 100132. <https://doi.org/10.1016/J.CLES.2024.100132>
- Reyes Morales, E. D., & Romero, J. R. (2019). *Aztlan, Teocolhuacan, el inicio de una migración y el fin de una Triple Alianza. Tiempos y lugares (Aztlan, Teocolhuacan, the Beginning of a Migration and the End of a Triple Alliance. Times and Places)*. <https://papers.ssrn.com/abstract=4439658>
- Rey-Hernández, C., & Bobbink, I. (2022). Chinampas Agriculture and Settlement Patterns: The Contemporary Relevance of Aztec Floating Gardens. *Blue Papers*, 1(2), 90–99. <https://doi.org/10.58981/BUEPAPERS.2022.2.09>
- Rivera de la Rosa, A. R., & Rivera de la Rosa, A. R. (2022). Tratado de Libre Comercio de América del Norte en México y el sector agropecuario: efecto Kaldor-Verdoorn. *Análisis Económico*, 37(96), 21–37. <https://doi.org/10.24275/UAM/AZC/DCSH/AE/2022V37N96/RIVERA>
- Rivera-Núñez, T. (2024). ¿Post conservación de territorios indígenas y campesinos en América Latina? *Journal of Political Ecology*, 31(1), 137–162. <https://doi.org/10.2458/JPE.5287>
- Rodrigues, A. P. (2023). The importance of agribusiness in the United States in promoting food security. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento*, 53–75. <https://doi.org/10.32749/NUCLEODOCONHECIMENTO.COM.BR/AGRONOMY-EN/IMPORTANCE-OF-AGRIBUSINESS>
- Rodriguez Paredes, N. P., Garcia Zare, E. J., & López Puycan, L. A. (2020). Comparación de pronósticos de caudales máximos con modelos ARIMA y redes neuronales artificiales. *Ciencias*, 4(4). <https://doi.org/10.33326/27066320.2020.4.988>
- Rosa, J. E. (2022). Una visión de la independencia de México: a propósito de las Memorias de las ocurrencias del reino de la Nueva España... *Estudios de Historia Moderna y Contemporánea de México*, 64, 249–268. <https://doi.org/10.22201/IIH.24485004E.2022.64.77803>

- Sadiku, M. N. O., Chukwu, U. C., & Sadiku, J. O. (2024a). Agriculture in Israel. *International Conference on Agriculture Sciences, Environment, Urban and Rural Development*, 1–11. <https://www.conferenceseries.info/index.php/morocco/article/view/1606>
- Sadiku, M. N. O., Chukwu, U. C., & Sadiku, J. O. (2024b). Agriculture in United Arab Emirates. *International Conference on Agriculture Sciences, Environment, Urban and Rural Development*, 24–32. <https://www.conferenceseries.info/index.php/morocco/article/view/1648>
- Salazar Rebolledo, J. A. (2023). Presente y pretérito: La crítica anti-imperialista de la Revolución mexicana desde la mirada iberoamericana de Cuadernos Americanos en torno del triunfo de la Revolución cubana en 1959. *Encartes*, 6(11). <https://doi.org/10.29340/EN.V6N11.299>
- Salem, R., Aidaros, B., & Belqasmi, F. (2024). Sustainable Industrial Agriculture in the UAE: Leveraging IoT and AI Technologies. *Proceedings of the 15th Annual Undergraduate Research Conference on Applied Computing on "AI for a Sustainable Economy."* URC 2024. <https://doi.org/10.1109/URC62276.2024.10604647>
- Sánchez, E. I. G. (2020). Impacto de la Covid-19 en el sector agroalimentario. Una revisión sistemática de la literatura. *Contraste Regional*, 8(16), 109–122. https://www.ciisder.mx/images/revista/contraste-regional-16/083_El_sector_agroalimentario_durante_la_crisis_de_la_Covid-19.pdf
- Sánchez-Gómez, C., Caamal-Cauich, I., & Pat-Fernández, V. G. (2024). Soberanía alimentaria en la producción y comercialización de hortalizas nativas de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(6), e3589–e3589. <https://doi.org/10.29312/REMEXCA.V15I6.3589>
- Sánchez-Velázquez, O. A., Luna-Vital, D. A., Morales-Hernandez, N., Contreras, J., Villaseñor-Tapia, E. C., Fragoso-Medina, J. A., & Mojica, L. (2023). Nutritional, bioactive components and health properties of the milpa triad system seeds (corn, common bean and pumpkin). *Frontiers in Nutrition*, 10. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2023.1169675>
- Santiago, E. R., Mayorga, F. B., & Salazar, J. A. G. (2022). Análisis del Mercado de maíz en México desde una perspectiva de precios. *Acta Universitaria*, 32, 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.15174/au.2022.3265>

- Saranya, T., Deisy, C., & Sridevi, S. (2023). Classical-Quantum Computing Model with MobileNet for Precise Pest Classification. *2023 International Conference on Energy, Materials and Communication Engineering, ICEMCE 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICEMCE57940.2023.10434179>
- Shahini, E., Skuraj, E., Sallaku, F., & Shahini, S. (2022). The supply shock in organic fertilizers for agriculture caused by the effect of Russia-Ukraine war. *Наукoвi Горизонти*, 25(2), 97–103. [https://doi.org/10.48077/scihor.25\(2\).2022.97-103](https://doi.org/10.48077/scihor.25(2).2022.97-103)
- Shavit, A., & Sharon, G. (2023). Can models of evolutionary transition clarify the debates over the Neolithic Revolution? *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 378(1872). <https://doi.org/10.1098/RSTB.2021.0413>
- SIAP. (2019). *Panorama Agroalimentario 2019*. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/
- Slater, Y., Reznik, A., Finkelshtain, I., & Kan, I. (2022). Blending Irrigation Water Sources with Different Salinities and the Economic Damage of Salinity: The Case of Israel. *Water* 2022, Vol. 14, Page 917, 14(6), 917. <https://doi.org/10.3390/W14060917>
- Slob, N., Hurst, W., van de Zedde, R., & Tekinerdogan, B. (2023). Virtual reality-based digital twins for greenhouses: A focus on human interaction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 208, 107815. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2023.107815>
- Smyth, J., & Gillis, R. (2022). Food and Farming Systems in the Neolithic – an Impossible Vista? *Environmental Archaeology*, 27(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/14614103.2021.1966260>
- Stock, J. H. (2015). Time Series: Economic Forecasting. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences: Second Edition* (pp. 337–340). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.42087-8>
- Suryo Putro S, B. C., Mustika, I. W., & Nugroho, L. E. (2018). Optimized Back-propagation Artificial Neural Network Algorithm for Smart Agriculture Applications. *Proceedings - 2018 4th International Conference on Science and Technology, ICST 2018*. <https://doi.org/10.1109/ICSTC.2018.8528655>

- Symeonaki, E., Maraveas, C., & Arvanitis, K. G. (2024). Recent Advances in Digital Twins for Agriculture 5.0: Applications and Open Issues in Livestock Production Systems. *Applied Sciences*, 14(2), 686. <https://doi.org/10.3390/app14020686>
- Taj, I., & Jhanjhi, N. Z. (2022). Towards Industrial Revolution 5.0 and Explainable Artificial Intelligence: Challenges and Opportunities. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 12(1), 285–310. <https://doi.org/10.12785/IJCDS/120124>
- Tal, A. (2021). Israeli Agriculture—Innovation and Advancement. *From Food Scarcity to Surplus*, 299–358. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9484-7_9
- Tanaka, T. S. T., Heuvelink, G. B. M., Mieno, T., & Bullock, D. S. (2024). Can machine learning models provide accurate fertilizer recommendations? *Precision Agriculture*, 25(4), 1839–1856. <https://doi.org/10.1007/S11119-024-10136-X/FIGURES/9>
- Tedeschi, L. O. (2024). 6 Transforming animal agriculture through hybrid modeling and quantum computing. *Journal of Animal Science*, 102(Supplement_3), 70–71. <https://doi.org/10.1093/JAS/SKAE234.078>
- Téllez, I. S. (2023). Animalidad y fisiología en la estética campesina de la Revolución mexicana. *Cuadernos de Música, Artes Visuales y Artes Escénicas*, 18(1), 68–79. <https://doi.org/10.11144/JAVERIANA.MAVAE18-1.AFRM>
- Tian, X., Hengl, T., Consoli, D., Schneider, F., Parente, L., Şahin, M., Minařík, R., & Ho, Y.-F. (2024). *Time-series of Landsat-based spectral indices for continental Europe for 2000--2022 to support soil health monitoring*. <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-4251113/V1>
- Tosoni, G. A., & García, C. C. (2022). Elevada desigualdad, pandemias, cambio tecnológico y desempleo: una reseña en tiempos del covid-19. *EconomíaUNAM*, 19(55), 143–173. <http://revistaeconomia.unam.mx/index.php/ecu/article/view/699/665>
- Tsench, Y. S., Сергеевна, Ц. Ю., Kosenko, V. V., Владимирович, К. В., Sharov, V. V., & Васильевич, Ш. В. (2023). The evolution of design of general

- purpose tracked tractors. *Tractors and Agricultural Machinery*, 89(3), 155–166. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109676>
- UNAM-Global. (2019, September 19). *Algunos datos interesantes del cerebro - UNAM Global*. https://unamglobal.unam.mx/global_revista/algunos-datos-interesantes-del-cerebro/
- Uribe-Reyes, J. (2014). *El sector agropecuario en México, una historia de marginación*. <http://hdl.handle.net/11117/1241>
- USDA. (2020). *Agriculture Innovation as a Solution for Farmers, Consumers, and the Environment*. <https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/agriculture-innovation-agenda-vision-statement.pdf>
- van Klompenburg, T., Kassahun, A., & Catal, C. (2020). Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105709. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2020.105709>
- Vastola, A., Viccaro, M., Grippo, V., Genovese, F., Romano, S., & Cozzi, M. (2023). The Decoupling Effect in Italian Agricultural Waste: An Empirical Analysis. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 16596, 15(24), 16596. <https://doi.org/10.3390/SU152416596>
- Vatambeti, R., Venkatesh, D., Mamidisetti, G., Damera, V. K., Manohar, M., & Yadav, N. S. (2023). Prediction of DDoS attacks in agriculture 4.0 with the help of prairie dog optimization algorithm with IDSNet. *Scientific Reports* 2023 13:1, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42678-x>
- Verín, C. A. G. S. (2018). Agricultura y Alimentación en el México Prehispánico y siglo XVI. *Geografías*, 25, 60–81. <https://doi.org/10.7147/GEO25.17805>
- Verma, H. C., Srivastava, S., Ahmed, T., Usmani, N. A., Verma, H. C., Srivastava, S., Ahmed, T., & Usmani, N. A. (2023). Cyber Threats in Agriculture and the Food Industry: An Indian Perspective. In M. Husain, M. Faisal, H. Sadia, T. Ahmad, & S. Shukla (Eds.), *Advances in Cyberology and the Advent of the Next-Gen Information Revolution* (pp. 109–122). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8133-2.CH006>

- Victor, N., Maddikunta, P. K. R., Mary, D. R. K., Murugan, R., Chengoden, R., Gadekallu, T. R., Rakesh, N., Zhu, Y., & Paek, J. (2024). Remote Sensing for Agriculture in the Era of Industry 5.0-A Survey. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 5920–5945. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3370508>
- Villa-Islas, V., Izarraras-Gomez, A., Larena, M., Campos, E. M. P., Sandoval-Velasco, M., Rodríguez-Rodríguez, J. E., Bravo-Lopez, M., Moguel, B., Fregel, R., Garfias-Morales, E., Tretmanis, J. M., Velázquez-Ramírez, D. A., Herrera-Muñoz, A., Sandoval, K., Nieves-Colón, M. A., Moreno, G. Z. G., Villanea, F. A., Medina, E. F. V., Aguayo-Haro, R., ... Ávila-Arcos, M. C. (2023). Demographic history and genetic structure in pre-Hispanic Central Mexico. *Science (New York, N.Y.)*, 380(6645). <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ADD6142>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2017.01.023>
- Zambon, I., Cecchini, M., Egidi, G., Saporito, M. G., & Colantoni, A. (2019). Revolution 4.0: Industry vs. Agriculture in a Future Development for SMEs. *Processes* 2019, Vol. 7, Page 36, 7(1), 36. <https://doi.org/10.3390/PR7010036>
- Zhang, N., Zhang, X., & Xiu, C. (2024). Does Agricultural Mechanization Help Farmers to Strengthen Sustainability and Protect Cultivated Land? Evidence from 2118 Households in 10 Provinces of China. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 6136, 16(14), 6136. <https://doi.org/10.3390/SU16146136>
- Zuleta, M. C. (2000). La Secretaría de Fomento y el fomento agrícola en México, 1876-1910: la invención de una agricultura próspera que no fue. *Mundo Agrario*, 1(1), 0–0. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1515-59942000000200004&lng=es&nrm=iso&tlng=es

CAPÍTULO III. El futuro de la alimentación mundial: Los cultivos dominantes en la Agricultura 5.0

Ignacio Caamal Cauich^a, Javier Medina Hernández^a, Verna Gricel Pat Fernández^a, José Antonio Ávila Dorantes^a & Carmela Pérez Hernández^b

RESUMEN: Actualmente, en el mundo existen miles de cultivos. Se analizaron estos cultivos utilizando datos de la FAO y Redes Neuronales Recurrentes (RNR) para generar pronósticos al 2050. Los resultados indicaron que la caña de azúcar, maíz grano, arroz, trigo y palma aceitera son los cultivos que dominan la producción agrícola mundial. Al 2050, la producción de estos cultivos seguirá aumentando, debido a los altos rendimientos derivados de la adopción tecnológica basada en Inteligencia Artificial General, característica de la Agricultura 5.0. En esta nueva Revolución Agrícola Superinteligente, será vital implementar políticas públicas que promuevan la soberanía alimentaria a futuro.

PALABRAS CLAVE: Agricultura mundial, inteligencia artificial general, perspectivas agrícolas, producción sostenible, rendimientos futuros.

Clasificación JEL: O13, Q11, Q16.

The future of global food: Dominant crops in Agriculture 5.0

ABSTRACT: There are currently thousands of crops in the world. These crops were analyzed using FAO data and Recurrent Neural Networks (RNN) to generate forecasts for 2050. The results indicated that sugarcane, maize grain, rice, wheat and palm oil are the crops that dominate global agricultural production. By 2050, the production of these crops will continue to increase, due to the high yields derived from the technological adoption based on Artificial General Intelligence, characteristic of Agriculture 5.0. In this new Superintelligent Agricultural Revolution, it will be vital to implement public policies that promote food sovereignty in the future.

KEYWORDS: Global agriculture, artificial general intelligence, agricultural outlook, sustainable production, future yields.

JEL classification: O13, Q11, Q16.

^a División de Ciencias Económico Administrativas (DICEA), Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Km. 38.5 carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230.

^b Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial (CIESTAAM), Universidad Autónoma Chapingo (UACH), Km. 38.5 carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230.

Agradecimientos: El autor Javier Medina Hernández agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada No. 884488.

Dirigir correspondencia a: Javier Medina Hernández.

Artículo enviado a la Revista Economía Agraria y Recursos Naturales

3.1 Introducción

En 2023, se estimó que 733 millones de personas sufrieron de hambre, el 9.1% de la población mundial, mientras que 2.33 mil millones (28.9%) se encuentran en situación de inseguridad alimentaria moderada o grave. África (20.4%), Asia (8.1%), Oceanía (7.3%) y América Latina y el Caribe (6.2%) son las regiones con mayor proporción de habitantes subalimentados (FAO *et al.*, 2024). La crisis alimentaria se agravó debido al crecimiento poblacional (FAO *et al.*, 2023), la recesión económica provocada por la pandemia de COVID-19 (Goodell, 2020) y la guerra en Ucrania (Shahini *et al.*, 2022). Estos factores ponen en riesgo el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030, especialmente el ODS 2 "Hambre cero" (ONU, 2018; Smith & Glauber, 2020).

A pesar de que se proyectó un crecimiento económico mundial del 5.5% en el año 2022, se observó una desaceleración en el desempeño de las economías durante el segundo semestre de 2021. Esta desaceleración se atribuye a varios factores, incluyendo la persistencia de la pandemia de COVID-19, que continuó afectando negativamente el crecimiento económico global en el corto plazo (GCMA, 2022). Las economías emergentes y en desarrollo, en particular, enfrentaron una reducción en su potencial de crecimiento debido a la menor disponibilidad de recursos y la inestabilidad financiera. Además, se ha demostrado que el crecimiento económico no siempre es un factor clave para reducir la pobreza ni para asegurar la soberanía alimentaria de los países (FAO *et al.*, 2023).

El Sector Agropecuario mundial se enfrenta a otros desafíos a largo plazo. Entre ellos se encuentran la disminución del número de agricultores, motivada por las migraciones del campo a la ciudad y la reducción de la productividad agrícola debido a sistemas ineficientes, altos costos de insumos y el cambio climático (Azzulin *et al.*, 2022; FAO, 2023b; Gil-Méndez, 2015).

Además, la degradación y pérdida de recursos naturales, principalmente por la sobreexplotación, deforestación y contaminación, representan una amenaza importante. La escasez de agua dulce (FAO, 2023b; 2024) y las crisis económicas agravan la situación (Espinosa Cortés, 2022), junto con los retos inherentes a la implementación de la Agricultura 5.0 (Ahmad & Nabi, 2021; Fountas *et al.*, 2024).

Estos desafíos aumentarán la incertidumbre en la disponibilidad de alimentos nutritivos, incrementando el número de personas que acepten alimentos de menor cantidad o calidad, incluso en ausencia de inseguridad alimentaria o en zonas urbanas (FAO *et al.*, 2024). Por lo tanto, el Sector Agropecuario será crucial para el desarrollo económico y la seguridad alimentaria hacia el 2050, tanto a nivel regional, nacional como mundial (FAO, 2018).

Para enfrentar estos retos, se requiere información confiable que ofrezca una visión integral a largo plazo del Sector Agropecuario. Es imprescindible crear un marco estratégico de nuevas políticas públicas que integren de manera eficiente la Inteligencia Artificial General (AGI), con el fin de automatizar procesos y utilizar los recursos naturales de manera eficiente, asegurando así una nutrición equilibrada y nutritiva para una población en crecimiento (Ahmad & Nabi, 2021; Bissadu *et al.*, 2024; Smith & Glauber, 2020).

Las propuestas de solución deben centrarse en el largo plazo, apoyándose en un análisis histórico de la producción de cultivos de importancia global. Diversas investigaciones en Economía han empleado la teoría de series de tiempo para analizar el pasado, presente y futuro de diversos fenómenos de estudio. Una serie de tiempo consiste en una secuencia de datos observados en intervalos temporales, lo que implica una dependencia inherente en el orden temporal de los datos discretos. Este método permite identificar tendencias y patrones que pueden ser fundamentales para la formulación de políticas y estrategias agrícolas a largo plazo (Aladag, 2017; Makridakis *et al.*, 2022; Stock, 2015).

Las series de tiempo son herramientas esenciales para la elaboración de pronósticos en diferentes horizontes temporales: corto, mediano y largo plazo. Diversos métodos han sido desarrollados para modelar y prever series de tiempo a largo plazo, destacándose entre ellos las Redes Neuronales Recurrentes (RNR). Las RNR son ampliamente utilizadas debido a su capacidad para identificar patrones tanto en series de tiempo lineales como no lineales, incluso cuando se trata de datos más grandes y complejos. Este enfoque permite realizar análisis precisos y confiables, fundamentales para la toma de decisiones informadas en múltiples campos de estudio (Makridakis *et al.*, 2022; Masini *et al.*, 2021; Stock, 2015).

En los pronósticos de la producción de los principales cultivos a nivel mundial, la utilización de modelos de series de tiempo univariados permite obtener resultados precisos. Para ello, se aplica el supuesto de *ceteris paribus*, que significa "todo lo demás constante", y se consideran

tanto la incertidumbre en los datos como el principio de parsimonia, según el cual, a iguales condiciones, la explicación más sencilla suele ser la más probable. Este enfoque permite desarrollar modelos eficientes, minimizando la complejidad y evitando el sobreajuste. Los pronósticos precisos de la producción agrícola mundial facilitarán el análisis de los cambios y la identificación de nuevos desafíos que afectan la alimentación global, proporcionando una base sólida para la formulación de políticas públicas y estrategias de gestión agrícola (FAO, 2023b; Masini *et al.*, 2021; Stock, 2015).

En este contexto global complejo, el objetivo del estudio fue identificar los cultivos dominantes del Sector Agropecuario mundial para el año 2050, utilizando análisis de datos y Redes Neuronales Recurrentes, para obtener pronósticos sobre la importancia económica y los desafíos futuros de los cultivos más relevantes.

3.2 Materiales y métodos

La información se obtuvo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2023a). Las variables estudiadas incluyeron la producción, los rendimientos, la superficie cosechada de los principales cultivos y el crecimiento de la población mundial. Los datos se organizaron en hojas de cálculo de Excel® para facilitar su análisis y visualización mediante gráficos. Este enfoque se usa para evaluar de forma detallada las tendencias agrícolas globales y su correlación con la dinámica poblacional.

Los pronósticos para el año 2050 se obtuvieron utilizando Redes Neuronales Artificiales del tipo recurrente, específicamente las utilizadas en aprendizaje profundo conocidas como "Memoria a Largo Corto Plazo" o *Long Short-Term Memory* (LSTM). La arquitectura y diseño de estas redes neuronales LSTM siguieron las teorías propuestas por Abbasimehr *et al.* (2020) y Greff *et al.* (2017). Las redes neuronales LSTM son especialmente adecuadas para encontrar patrones en series de tiempo y se adaptan mejor a conjuntos de datos grandes y al ajuste de parámetros específicos para cada fenómeno de estudio. Estas características permiten realizar análisis precisos y confiables, fundamentales para la planificación a largo plazo (Masini *et al.*, 2021).

3.3 Resultados

En el año 2021, la demanda global de cultivos agrícolas superó los 9,490 millones de toneladas (Mton). No obstante, la producción mundial se concentró en 115 productos agrícolas, cada uno con una producción superior a 1 Mton. Dentro de estos, 30 productos destacaron por superar las 50 Mton. Más notable aún, solo 10 de estos cultivos lograron rebasar las 200 Mton. Entre ellos, 4 superaron las 500 Mton y, de manera destacada, únicamente 2 cultivos lograron el hito de exceder las 1,000 Mton (Figura 1). Este análisis de los resultados subraya la centralización de la producción agrícola en un número reducido de cultivos de alta demanda, lo que tiene importantes implicaciones y se destacan los posibles desafíos de enfocar la producción en estos cultivos dominantes (FAO, 2023a).

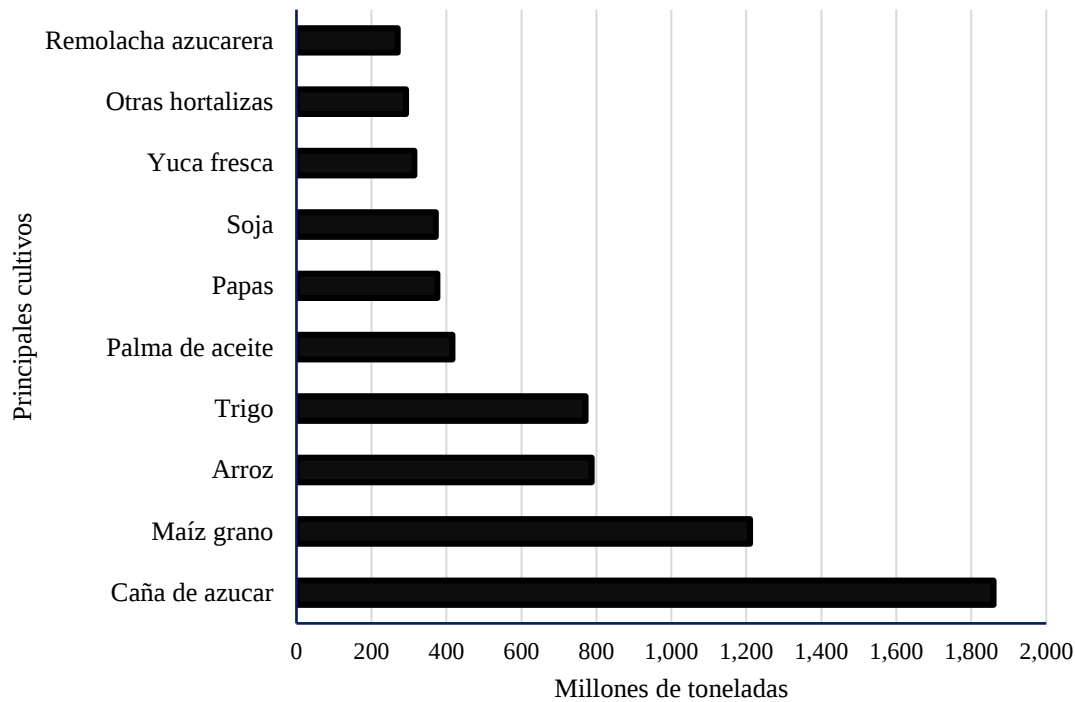


Figura 3-1. Los cultivos que dominaron la producción agrícola en el año 2021.

Fuente: Elaboración propia con información de la FAO (2023a).

Se identificó y se seleccionaron a los 10 cultivos más relevantes en la producción global a través de este análisis. Los cultivos dominantes fueron: caña de azúcar, maíz grano, arroz, trigo, palma de aceite, papas, soja, yuca fresca, otras hortalizas frescas y remolacha azucarera.

Estos cultivos contribuyeron con el 19.59, 12.75, 8.30, 8.12, 4.39, 3.96, 3.92, 3.32, 3.08, 2.85, 1.99, 1.53, 1.12 y 1.07 por ciento, respectivamente, del total de la producción agrícola mundial, según datos de la FAO (2023a).

La cantidad de toneladas producidas en 2021 se debe, en parte, a la superficie destinada a la cosecha de los cultivos. En el caso de los cultivos predominantes, se estima que ocupan el 69% de la superficie total cosechada a nivel mundial (Figura 2). Entre estos cultivos, el trigo, maíz, arroz, soja y cebada presentaron las mayores superficies cosechadas, representando 15.07, 14.05, 11.28, 8.84 y 3.34 en términos porcentuales, respectivamente. Notablemente, la caña de azúcar, que fue el único cultivo en superar las 1,859 Mton producidas en 2021, ocupó solo el 1.8% de la superficie, es decir, 26.35 millones de hectáreas (Mha). Este panorama subraya la eficiencia y la capacidad productiva de ciertos cultivos clave, así como la importancia de la gestión de superficies agrícolas y uso de tecnologías avanzadas para maximizar la producción agrícola (FAO, 2023a).

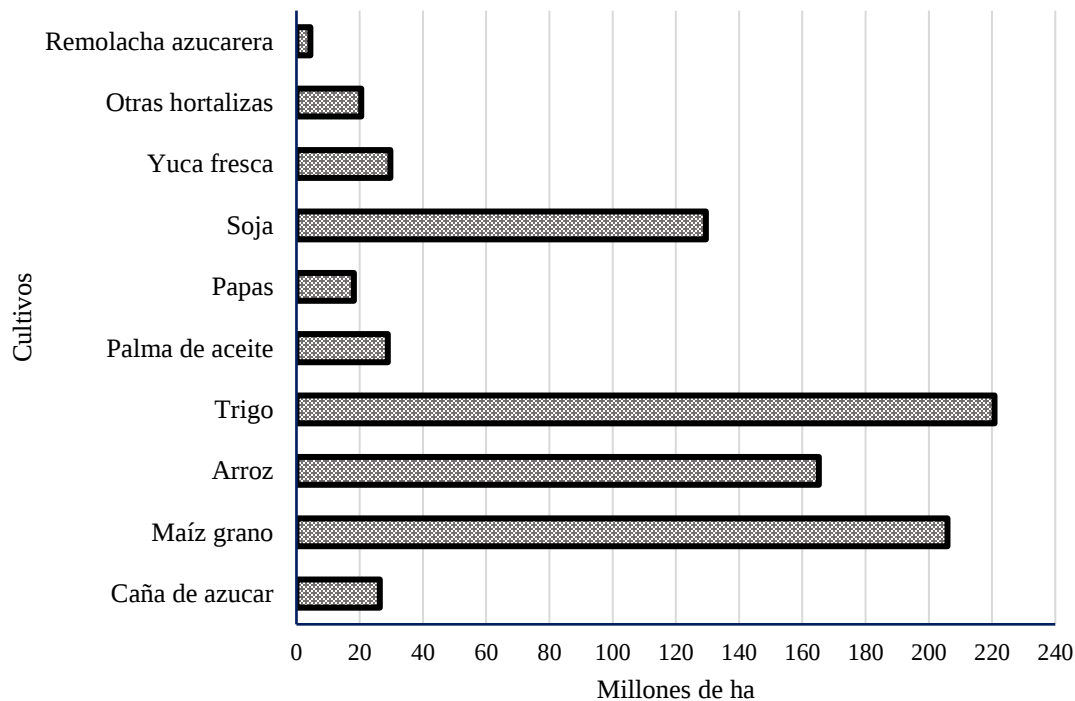


Figura 3-2. La superficie cosechada de los principales cultivos producidos en el año 2021.

Fuente: Elaboración propia con información de la FAO (2023a).

El elevado volumen de producción de la caña de azúcar se atribuye a sus altos rendimientos, alcanzando el primer lugar mundial con 70.57 toneladas por hectárea (ton/ha; Figura 3). A continuación, se situaron la remolacha azucarera con 61.41 ton/ha, los pepinos con 43.06 ton/ha, las zanahorias y los nabos con 38.02 ton/ha, y los tomates frescos con 36.60 ton/ha. Este orden refleja la capacidad productiva de estos cultivos, subrayando la importancia de la eficiencia en la producción agrícola global (FAO, 2023a).

Se observaron rendimientos relativamente bajos en cultivos como el maíz grano (5.88 ton/ha), arroz (4.76 ton/ha), trigo (3.49 ton/ha) y soja (2.87 ton/ha), en comparación con la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Sin embargo, la extensa superficie del dedicada a estos cultivos les permitió ocupar los primeros lugares en términos de producción mundial. Este fenómeno destaca la importancia de la superficie cosechada en la evaluación de la producción agrícola global, superando la producción mundial de los cultivos con altos rendimientos por hectárea (FAO, 2023a).

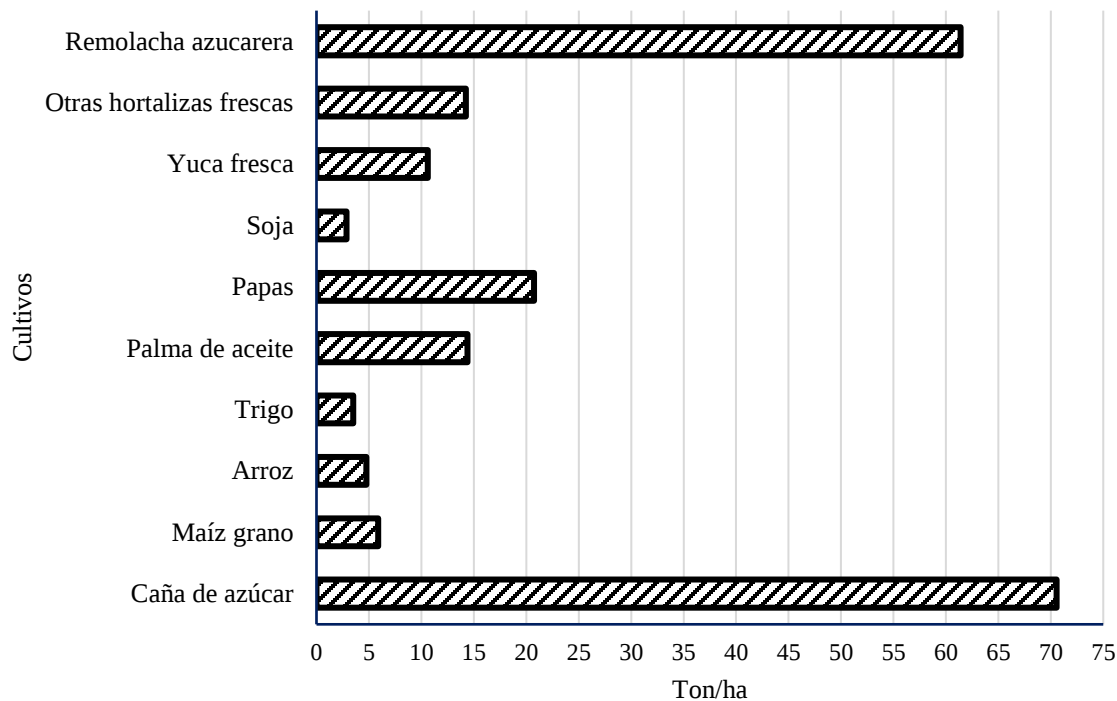


Figura 3-3. Los rendimientos de los principales cultivos producidos en el año 2021.

Fuente: Elaboración propia con información de la FAO (2023a).

La producción agrícola global ha aumentado significativamente en los últimos 60 años (Figura 4). Con la comparación del volumen de producción mundial de los principales cultivos desde 1961 hasta 2021, se estimó una tasa de variación de 315% para la caña de azúcar, 490% para el maíz grano, 265% para el arroz, 247% para el trigo, 2 954% para la palma de aceite, 39% para las papas, 1 283% para la soja, 342% para la yuca fresca, 369% para otras hortalizas frescas y 68% para la remolacha azucarera (FAO, 2023a). Estos incrementos reflejan la evolución de las prácticas agrícolas, la innovación tecnológica y las políticas de producción implementadas en cada cultivo.

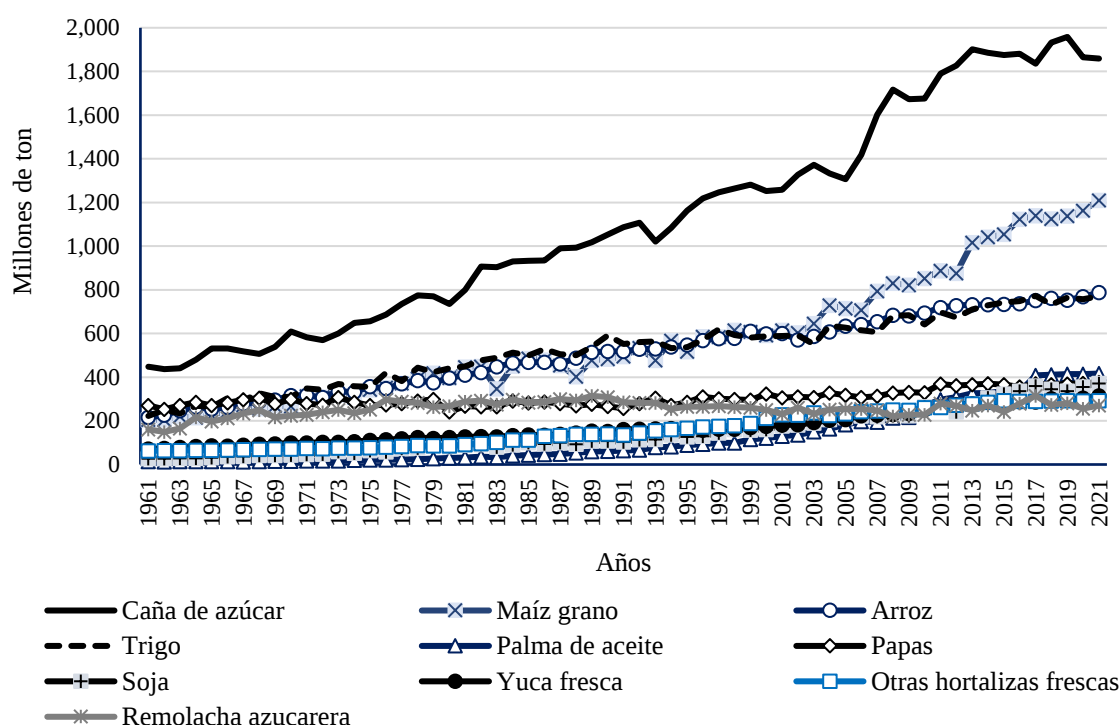


Figura 3-4. Comportamiento de la producción agrícola en cultivos dominantes, 1961-2021.

Fuente: Elaboración propia con información de la FAO (2023a).

Para el año 2050, se anticipa que los cultivos dominantes en términos de producción mundial en 2021 experimenten una tasa de variación positiva. Específicamente, se prevé un aumento de 36% para la caña de azúcar, 35% para el maíz grano, 37% para el arroz, 36% para el trigo, 44% para la palma de aceite, 16% para las papas, 48% para la soja, 35% para la yuca fresca, 46% para otras hortalizas frescas y 7% para la remolacha azucarera (Figura 5). Este incremento en la producción estará basado en el aumento de los rendimientos por hectárea,

ya que las áreas con condiciones óptimas de fertilidad y riego están actualmente sobreexplotadas (FAO, 2023a; 2023b). Esta proyección subraya la necesidad de innovaciones tecnológicas y prácticas agrícolas sostenibles para mejorar los rendimientos sin expandir la superficie agrícola.

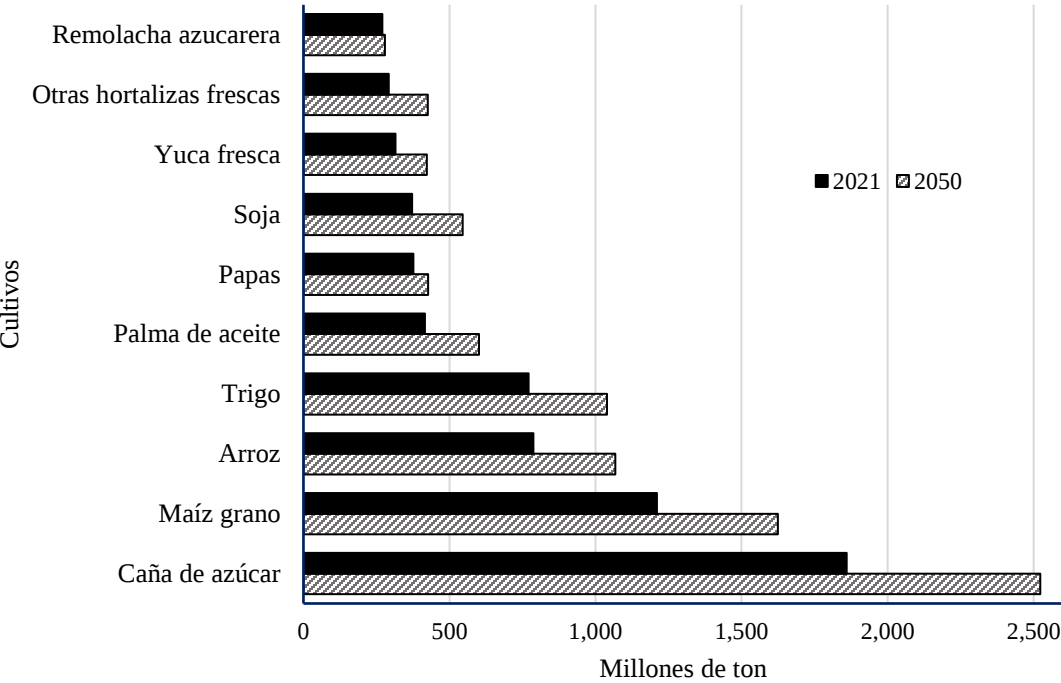


Figura 3-5. Pronósticos al 2050 de la producción en los diez cultivos dominantes.

Fuente: Elaboración propia con información de la FAO (2023a) para el 2021.

3.4 Discusión

Para el año 2050, se prevé que el consumo per cápita de alimentos procesados aumentará significativamente. Este incremento exigirá una mayor producción de azúcar y aceite vegetal para satisfacer la demanda. Además, se anticipa un aumento en el número de personas con sobrepeso y obesidad, consecuencia del desabasto de alimentos nutritivos como frutas y hortalizas. Esta tendencia afectará especialmente a las personas de bajos ingresos, quienes enfrentarán mayores dificultades para mantener una alimentación saludable (FAO *et al.*, 2023; 2024).

Además, para año 2050, se espera que el consumo de carne esté reservado principalmente para la población con mayores ingresos. Se anticipa que los precios de los productos básicos se mantendrán en los niveles actuales gracias a los subsidios gubernamentales. Las regiones con mayor demanda de alimentos serán África Subsahariana, India, Oriente Medio y África del Norte. Además, se requerirá un aumento en la producción de maíz y soja para forraje, bioetanol y otros derivados. Países como Indonesia, China y Brasil liderarán la demanda de biocombustibles (FAO, 2022; FAO *et al.*, 2023; 2024; OECD/FAO, 2020).

La educación digital avanzada se presenta como otro desafío crucial para los productores agrícolas en el futuro, con el objetivo de prevenir el desempleo masivo debido a la implementación de tecnologías emergentes en la Agricultura 5.0. Estas innovaciones incluyen la integración y aplicación eficiente de avances recientes en Aprendizaje Profundo, Enormes Modelos de Lenguaje, Computación Cuántica, Gemelos Digitales, Blockchain, Internet de las Cosas (IoT), Big Data e Inteligencia Artificial General (AGI, por sus siglas en inglés, *Artificial General Intelligence*). La AGI es un tipo avanzado de Inteligencia Artificial que iguala o supera las capacidades humanas en diversas tareas cognitivas, lo que permitirá a los grandes productores aumentar la eficiencia y productividad (Ahmad & Nabi, 2021; FAO, 2022; Fountas *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2023; Martos *et al.*, 2021).

En las próximas décadas, el desarrollo de máquinas autónomas capaces de tomar decisiones en tiempo real, equipadas con sensores conectados al Internet de las Cosas (IoT), permitirán la realización de tareas agrícolas sin o con mínima intervención humana. Estas innovaciones se integrarán con la AGI, lo que podría sustituir numerosos puestos de trabajo como operadores de maquinaria agrícola y trabajadores temporales encargados de preparar el terreno, sembrar, trasplantar, regar, fertilizar, desmalezar, controlar plagas y enfermedades, cosechar y trasladar productos agropecuarios (Ahmad & Nabi, 2021; Buka *et al.*, 2022; Haloui *et al.*, 2024).

Los desafíos actuales exigen soluciones inmediatas que trasciendan los ciclos económicos y políticos a corto plazo, con el objetivo de mejorar los ingresos de la población mundial en situación de pobreza y pobreza extrema. Reducir el número de personas que padecen hambre es esencial para asegurar que la producción agrícola y ganadera sea suficiente para alimentar a la mayoría de la población en el horizonte del año 2050 (FAO, 2022; FAO *et al.*, 2024).

Además, es crucial implementar políticas ambientales robustas que permitan la restauración de los recursos naturales, fomenten sistemas de producción sostenibles y aseguren el bienestar de las generaciones presentes y futuras (FAO, 2024). La relación entre la disponibilidad de alimentos y la salud pública será un tema crucial para el desarrollo de políticas alimentarias y agrícolas. Este enfoque integral abordará las necesidades alimentarias, la sostenibilidad y la resiliencia del sistema agrícola global, considerando los desafíos tecnológicos significativos para el empleo y la capacitación en el sector agrícola (FAO, 2023b; Haloui *et al.*, 2024; Tosoni & García, 2022).

América Latina y el Caribe se perfilan como una región con una creciente participación en el comercio agrícola mundial a largo plazo, gracias a la disponibilidad de extensas superficies de tierra y recursos hídricos aptos para la producción agropecuaria. Actualmente, la región aporta el 14% de la producción agrícola mundial y concentra el 23% de las exportaciones globales. Se espera, además, un incremento en el número de mujeres latinoamericanas que se involucren en actividades agrícolas y pecuarias. Este panorama subraya la necesidad de proporcionar educación digital avanzada, créditos y servicios de extensión agrícola a mujeres y pequeños productores, con el fin de optimizar sus medios y prácticas productivas. La implicación de más mujeres en la agricultura puede aumentar la eficiencia y la innovación en el sector, promoviendo el desarrollo sostenible y equitativo en la región (FAO, 2022; OECD/FAO, 2020).

Finalmente, se proyecta que la producción agrícola mundial aumentará un 15% debido a la investigación, desarrollo e implementación de innovaciones tecnológicas asociadas a la Agricultura 5.0. Estos nuevos paradigmas en los sistemas de producción agrícola iniciarán una nueva Revolución Agrícola Superinteligente. Esta revolución se caracterizará por la adopción de métodos de producción más eficientes, sostenibles, autónomos e hiperconectados, capaces de adaptarse al cambio climático, impulsar el crecimiento económico y satisfacer la creciente demanda alimentaria de una población mundial que, se estima, alcanzará los 10,000 millones de habitantes para el año 2050. Esta transformación tecnológica tendrá un impacto importante en la eficiencia de los sistemas de producción de los grandes productores y se buscará la sostenibilidad global a largo plazo (Ahmad & Nabi, 2021; Martos *et al.*, 2021; ONU, 2023).

3.5 Conclusiones

En el planeta Tierra existe una notable diversidad de cultivos agrícolas; sin embargo, la producción y la superficie cosechada total se concentran en un grupo reducido de diez cultivos agrícolas. Entre estos, la caña de azúcar, maíz grano, arroz y trigo destacan como los cultivos de mayor relevancia en los sistemas productivos actuales. La creciente demanda mundial de alimentos, impulsada por el aumento de la población y la persistencia de la pobreza, representarán un desafío considerable para el Sector Agropecuario a largo plazo.

En este contexto, se pronostica que el incremento en la productividad, más que la expansión de la superficie cosechada, será la estrategia clave para garantizar la seguridad alimentaria global en 2050. Esta estrategia será crucial para asegurar que, con los recursos agrícolas limitados, se pueda satisfacer la demanda alimentaria de una población mundial en constante crecimiento. Aunque, no se asegura que se logre la soberanía alimentaria, principalmente en los países en desarrollo.

Se proyecta un crecimiento significativo en la producción de los diez cultivos dominantes, condicionado también a la implementación de políticas públicas adaptadas a cada tipo de productor, la adopción de sistemas de producción sostenibles y la integración de tecnologías emergentes basadas en Inteligencia Artificial General (AGI), que son características distintivas de la Agricultura 5.0. Esta transformación en la producción, distribución y consumo de alimentos en el mundo dará lugar a una nueva Revolución Agrícola Superinteligente, sin precedentes en la historia de la humanidad.

3.6 Bibliografía

- Abbasimehr, H., Shabani, M., & Yousefi, M. (2020). An optimized model using LSTM network for demand forecasting. *Computers and Industrial Engineering*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106435>
- Ahmad, L., & Nabi, F. (2021). *Agriculture 5.0: Artificial Intelligence, IoT and Machine Learning*. CRC Press.
- Aladag, C. H. (2017). *Advances in time series forecasting* (Vol. 2). Bentham Science Publishers. <https://doi.org/10.2174/97816810852891170201>

- Azzulin, M. B., Jazar, M. M., Jedy, A., & Fernandes, V. (2022). Industrialization and Urbanization: An Intrinsic Relationship in the Global South. *Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, 11(3), 202–213. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2022V11I3.P202-213>
- Bissadu, K. D., Sonko, S., & Hossain, G. (2024). Society 5.0 enabled agriculture: Drivers, enabling technologies, architectures, opportunities, and challenges. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2024.04.003>
- Buka, S., Tkachuk, V., Kondratiuk, V., Tonkha, O., & Slobodyanyuk, N. (2022). Prospects for agribusiness in Ukraine over the next 5 years. *International Journal of Environmental Studies*, 1–8. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2157630>
- Espinosa Cortés, L. M. (2022). Hegemonía de Estados Unidos en el orden agroalimentario mundial y la pérdida de la autosuficiencia alimentaria de México. *CIENCIA Ergo-Sum*, 29(1). <https://doi.org/10.30878/ces.v29n1a4>
- FAO. (2018). *The future of food and agriculture - Alternative pathways to 2050*. <https://www.fao.org/global-perspectives-studies/fofa>
- FAO. (2022). The Future of food and agriculture - Drivers and triggers for transformation. In *The Future of Food and Agriculture*, no. 3. FAO Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cc0959en>
- FAO. (2023a). *FAOSTAT Statistical Database*. www.fao.org/faostat/en/
- FAO. (2023b). *Repercusiones de los desastres en la agricultura y la seguridad alimentaria 2023: Evitar y reducir las pérdidas mediante la inversión en la resiliencia*. <https://doi.org/10.4060/cc7900en>
- FAO. (2024). *El estado de los bosques del mundo 2024: Innovaciones en el sector forestal para lograr un futuro más sostenible*. <https://doi.org/10.4060/cd1211es>
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO. (2023). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2023: Financiación para acabar con el hambre, la inseguridad alimentaria y la malnutrición en todas sus formas*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cc3017es>

- FAO, IFAD, WHO, WFP, & UNICEF. (2024). *El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2024*. <https://doi.org/10.4060/cd1254es>
- Fountas, S., Espejo-Garcia, B., Kasimati, A., Gemtou, M., Panoutsopoulos, H., & Anastasiou, E. (2024). Agriculture 5.0: Cutting-Edge Technologies, Trends, and Challenges. *IT Professional*, 26(1), 40–47. <https://doi.org/10.1109/MITP.2024.3358972>
- GCMA. (2022). *Perspectivas Agroalimentarias 2022*. <https://gcma.com.mx/descargas/perspectivas-agroalimentarias-2022/>
- Gil-Méndez, J. (2015). Neoliberalismo, políticas agrarias y migración. Consecuencias de un modelo contra los productores. *Ra Ximhai*, 11(2), 145–162. <https://raximhai.uaim.edu.mx/index.php/rx/article/view/555>
- Goodell, J. W. (2020). COVID-19 and finance: Agendas for future research. *Finance Research Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2020.101512>
- Greff, K., Srivastava, R. K., Koutník, J., Steunebrink, B. R., & Schmidhuber, J. (2017). LSTM: A search space odyssey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 28(10), 2222–2232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582924>
- Haloui, D., Oufaska, K., Oudani, M., & El Yassini, K. (2024). Bridging Industry 5.0 and Agriculture 5.0: Historical Perspectives, Opportunities, and Future Perspectives. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 3507, 16(9), 3507. <https://doi.org/10.3390/SU16093507>
- Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. (2022). M5 accuracy competition: Results, findings, and conclusions. *International Journal of Forecasting*, 38(4), 1346–1364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.11.013>
- Martos, V., Ahmad, A., Cartujo, P., & Ordoñez, J. (2021). Ensuring agricultural sustainability through remote sensing in the era of agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11(13), 5911. <https://doi.org/10.3390/app11135911>

- Masini, R. P., Medeiros, M. C., & Mendes, E. F. (2021). Machine learning advances for time series forecasting. *Journal of Economic Surveys*, 37(1), 76–111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/joes.12429>
- OECD/FAO. (2020). OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2028. In *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2019-2028*. <https://doi.org/10.4060/ca4076es>
- ONU. (2018). *La agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>
- ONU. (2023). *World Population Prospects 2022*. <https://population.un.org/wpp/>
- Shahini, E., Skuraj, E., Sallaku, F., & Shahini, S. (2022). The supply shock in organic fertilizers for agriculture caused by the effect of Russia-Ukraine war. *Наукoвi Горизонти*, 25(2), 97–103. [https://doi.org/10.48077/scihor.25\(2\).2022.97-103](https://doi.org/10.48077/scihor.25(2).2022.97-103)
- Smith, V. H., & Glauber, J. W. (2020). Trade, policy, and food security. *Agricultural Economics (United Kingdom)*, 51(1), 159–171. <https://doi.org/10.1111/agec.12547>
- Stock, J. H. (2015). Time Series: Economic Forecasting. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences: Second Edition* (pp. 337–340). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.42087-8>
- Tosoni, G. A., & García, C. C. (2022). Elevada desigualdad, pandemias, cambio tecnológico y desempleo: una reseña en tiempos del covid-19. *EconomíaUNAM*, 19(55), 143–173. <http://revistaeconomia.unam.mx/index.php/ecu/article/view/699/665>

CAPÍTULO IV. Current challenges and forecasts in maize grain production and consumption in Mexico

Medina-Hernández, Javier¹; Caamal-Cauich, Ignacio^{1*}; Pat-Fernández, Verna G.¹; Ávila-Dorantes, José A.¹

¹ Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5, carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56230.

* Correspondence: icaamal82@yahoo.com.mx

4.1 ABSTRACT

Objective: to analyze production and consumption of maize grain in Mexico, with time series and recurrent neural networks, to describe the present and future situation of maize cultivation.

Design/Methodology/Approach: key variables were analyzed in graphs and maps created in Excel® and SCImago Graphica®, respectively. Forecasts for the year 2050 were obtained in Python® with Recurrent Neural Network (RNN) of the Long Short-Term Memory (LSTM) type, and were compared with the years 1980 and 2020.

Results: the largest production of white and yellow maize grain was obtained by the United States and China. Mexico ranks seventh, is not competitive in exports, and relies on imports of yellow maize grain from the United States to supply demand. The Mexican states that implemented technology packages showed higher yields and production. By 2050, maize grain production in Mexico will increase due to the technological advances of Agriculture 5.0 Although it would not be enough to supply the apparent consumption of the growing population, for this reason imports will increase.

Limitations/Implications of the study: analysis of the possible future, created from time series through RNN-LSTM, helps to guide decision-making in the present.

Findings/Conclusions: new agricultural public policies are needed to guide, in the long term, the challenges of maize grain production and consumption in Mexico to guarantee food sovereignty.

Keywords: yields, imports, exports, time series, deep neural networks.

Citation: Medina-Hernández, J., Caamal-Cauich, I., Pat-Fernández, V. G., & Ávila-Dorantes, J. A. (2024). Current challenges and forecasts in maize grain production

and consumption in Mexico. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v17i5.2741>

Academic Editor: Jorge Cadena Iñiguez

Guest Editor: Daniel Alejandro Cadena Zamudio

Received: November 14, 2023.

Accepted: April 19, 2024.

Published on-line: June 07, 2024.

Agro Productividad, 17(5). May. 2024. pp: 165-172.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International license.



4.2 INTRODUCTION

Maize (*Zea mays* L.) has its center of origin and domestication in Mexico. It is one of the most economically important crops in the world, as it is necessary for human food, animal feed, and to obtain industrial products. Maize grain, and green maize fodder are harvested (López-Torres *et al.*, 2016; Cadet Díaz and Guerrero Escobar, 2018). There are several varieties; their use depends on agricultural goals (Sánchez-Ramírez *et al.*, 2023).

In 2021, maize grain was the second most produced crop in the world, with 1210 million tons [Megagrams] (M Mg), and with the second largest harvested area, about 206 million hectares. For this reason, it ranked only after sugarcane (1859 M Mg) and wheat (221 million ha), respectively (FAO, 2023). However, it is necessary to increase yields with the least use of resources to meet global demand in the future (FAO, 2022).



Maize yields in Mexico increased due to the management of improved varieties, agrochemicals, machinery, credits, and irrigation (Cadet-Díaz and Guerrero-Escobar, 2018). In self-consumption production, farmers conserve native maize varieties (Sánchez- Ramírez *et al.*, 2023) that will be necessary in the genetic improvement of Agriculture 5.0. In addition to biotechnology, in the long term, artificial intelligence, Big Data, blockchain and automation will increase productivity and the supply of maize grain (Ahmad and Nabi, 2021; Martos *et al.*, 2021).

Time series are used to characterize the supply and demand of maize grain in Mexico. In addition, they make it possible to calculate forecasts necessary to guide decision-making in the present (Aladag, 2017; Mills, 2019). One of the most widely used methods is recurrent neural networks – RNNs, especially those of the deep LSTM type, because they give more accurate results to complex linear and nonlinear problems (Abbasimehr *et al.*, 2020).

The objective of this research was to analyze production and consumption of maize grain in Mexico, with time series through recurrent neural networks, to describe the present and future situation of maize cultivation.

4.3 MATERIALS AND METHODS

4.3.1 Data set

Data were downloaded from the Mexican Agri-Food and Fisheries Information Service (SIAP, 2023b) and the United Nations Food and Agriculture Organization (FAO, 2023). The key variables analyzed for maize grain in Mexico were production, apparent consumption, exports, imports, yields, and harvested area.

4.3.2 Time series analysis

Discrete time series were implemented with annual data (x_t), from 1961 to 2021, $x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-n}$ (Aladag, 2017; Mills, 2019). A descriptive analysis was performed in the time series with graphs created in Excel®, maps in SCImago Graphica® and forecasts towards 2050 in Python® version 3.12, with the use of recurrent neural networks – RNN, for the variables production, apparent consumption, import and export to compare the present (2020) with the data from 30 years ago (1990) and up to 30 years towards the future (2050).

4.3.3 Recurrent Neural Networks

A Deep Neural Network (DNN) model of the recurrent type, known as recurrent neural networks for short- and long-term memory analysis (RNN-LSTM), was selected to obtain the forecasts to 2050. They were designed under the theory of Greff *et al.* (2017) and Abbasimehr *et al.* (2020), with the following architecture: an input layer, six hidden layers with 32 neurons each, and an output layer (Figure 1). The input layer of the RNN-LSTM received the time series data, and the output layer of the network generated the forecast up to 2050. An RNN-LSTM was trained for each of the key variables to be predicted.

For the RNN-LSTM performance evaluation, the root mean squared error (RMSE) was used $\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \hat{x}_t)^2}$ where x_t and $\hat{x}_t$ are the actual and predicted values of the series, respectively; n is the length of the test set (Abbasimehr *et al.*, 2020).

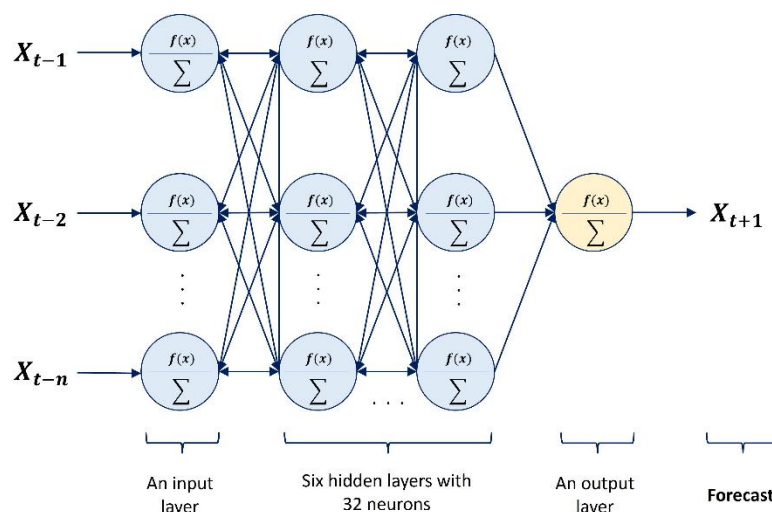


Figure 4-1. Architecture of a recurrent neural network for short- and long-term memory analysis (RNN-LSTM). Source: elaborated by the authors with information from Greff *et al.* (2017) and Abbasimehr *et al.* (2020).

4.4 RESULTS AND DISCUSSION

4.4.1 World scope of maize grain production

In 2021, the countries with the highest corn grain production (M Mg) were the United States, 384; China, 273; Brazil, 89; Argentina, 61; Ukraine, 42; India, 32; and Mexico, 28 (Figure 2). The United States and China contributed 54% (657 M Mg), with respective 320 and 1413% rates of change. This unprecedented increase led to a 490% increase in global maize production (FAO, 2022; 2023).

In order to maintain this pace further, production systems need to be oriented to solve the following challenges: climate change; pandemics; war and conflicts; genetically modified organisms; lack of credit; high prices; scarce and underage skilled labor (Cadet-Díaz and Guerrero-Escobar, 2018; Kato-Maldonado and Huerta-Moreno, 2022; Shahini *et al.*, 2022).

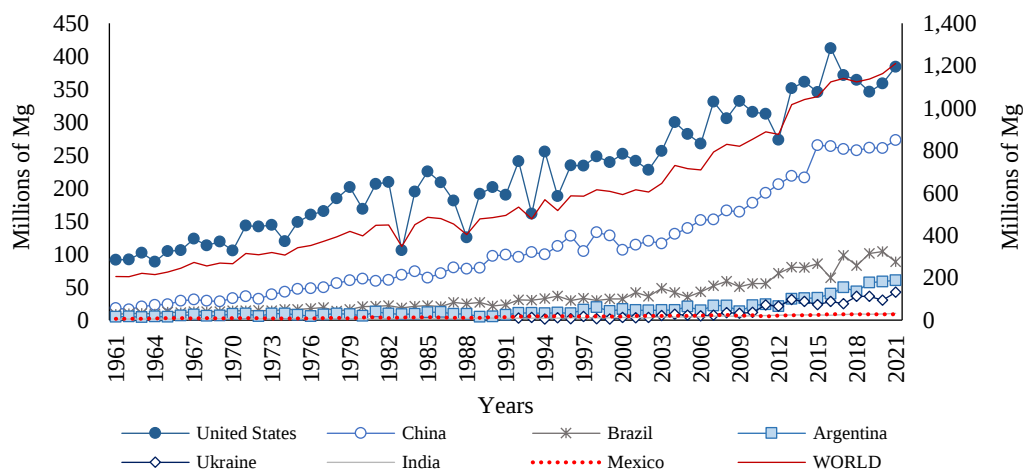


Figure 4-2. Behavior of maize grain production in the main producing countries and world total, 1961-2021. Source: elaborated by the authors using data from FAO (2023).

4.4.2 Production and consumption perspectives of maize in Mexico

The problems described are aggravated in developing countries, such as Mexico, because it disrupts free trade, raises prices for supplies (Shahini *et al.*, 2022) and poverty levels. In 2022, 46.8 million Mexicans (36.3%) were in poverty and 9.1 million (7.1%) in extreme poverty (CONEVAL, 2023). In addition, these are maize producers for self-consumption who are located in rural and peri-urban areas (López-Torres *et al.*, 2016; FAO, 2022).

Another challenge faced by Mexico is to supply the apparent domestic consumption (44.80 M Mg, Figure 3) (FAO, 2023) for 127 million Mexicans (ONU, 2023), with the domestic production of white (24.29 M Mg) and yellow (2.80 M Mg) maize grain. The latter was not enough and 15.81 M Mg of yellow maize grain was imported from the United States in 2021 (SIAP, 2023a).

Yellow maize was destined for livestock feed (15.50 M Mg) and the starch industry (3.02 M Mg; SIAP, 2023a). This makes Mexico dependent on production from the United States (Espinosa Cortés, 2022) and uncompetitive in exports [0.097 M Mg] (FAO, 2023).

On the other hand, in 2021 the main producer states of this staple in Mexico were Sinaloa, Jalisco, State of Mexico, Guanajuato, and Michoacán, with 5.54, 3.95, 1.94, 1.93, and 1.91 M Mg, respectively (Figure 4). Sinaloa, Guanajuato, Chihuahua, Michoacán, and Sonora produced 5.47, 1.48, 1.43, 0.82 and 0.79 M Mg, under irrigation systems. The states with the highest rainfed production were Jalisco, State of Mexico, Guerrero, Veracruz, Chiapas, and Michoacán, with 3.60, 1.57, 1.29, 1.25, 1.24, and 1.08 M Mg, respectively (SIAP, 2023b).

The production of rainfed maize in these states was significant due to the greater amount of harvested area (Figure 5) not to yields. Jalisco only obtained a yield of 6.66 Mg ha⁻¹; State of Mexico 3.74; Guerrero, 2.80; Veracruz, 2.26; Chiapas, 1.83; and Michoacán,

3.16 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2023b). The importance of rainfed maize production is based on the diversity and conservation of native maize varieties, grown by small-scale producers in traditional production systems, under extreme climatic and topographic conditions (López-Torres *et al.*, 2016).

In contrast, the highest yields (Mg ha⁻¹) of cultivated maize obtained with irrigation systems were Sinaloa, 11.89; Sonora, 11.56; Baja California, 11.47; Chihuahua, 11.13; and

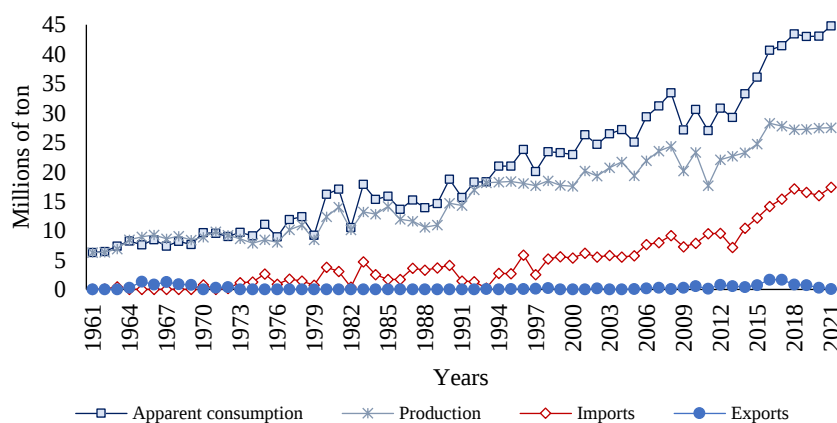


Figure 4-3. Historical behavior of apparent consumption, production, imports, and exports of maize grain in Mexico, 1961-2021. Source: elaborated by the authors using data from FAO (2023).

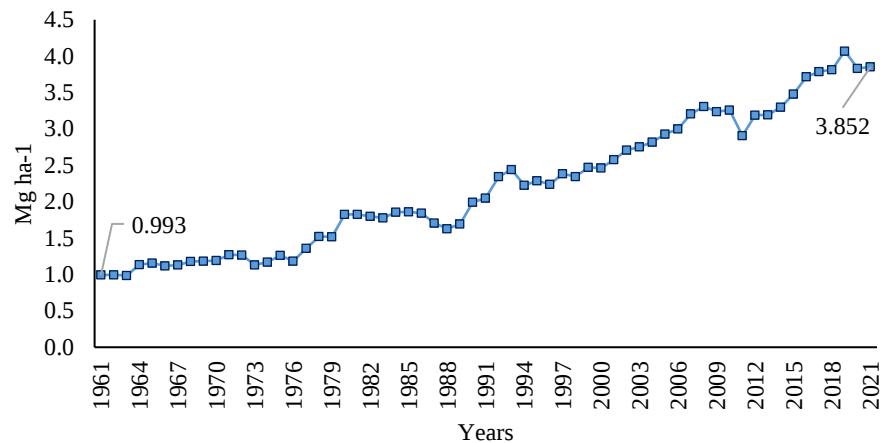


Figure 4-6. Behavior of the domestic yield of maize grain in Mexico, 1961-2021. Source: elaborated by the authors using data from FAO (2023).

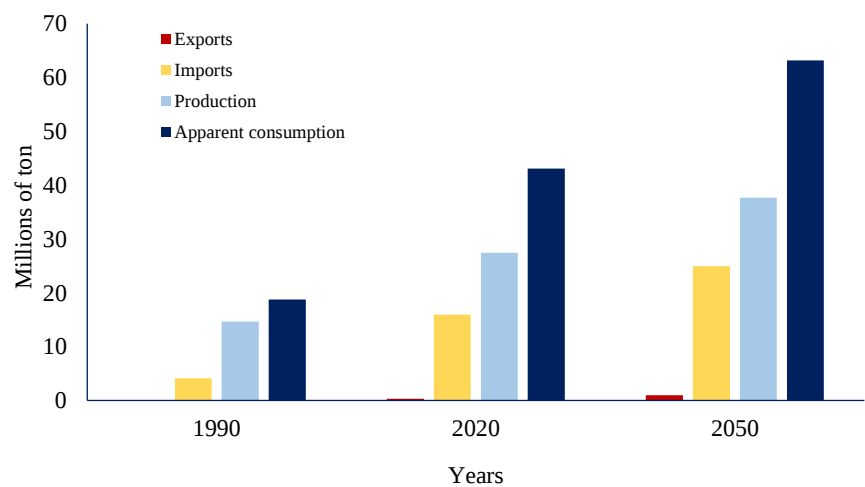


Figure 4-7. Forecasts for the year 2050 of the export, import, production and apparent consumption of grain corn in Mexico. Source: elaborated by the authors using data [1990 and 2020] from FAO (2023).

production of organic crops (Cadet-Díaz and Guerrero-Escobar, 2018; Ahmad and Nabi, 2021; Martos *et al.*, 2021; Buka *et al.*, 2022).

Agriculture 5.0 will also bring new challenges: reduction of repetitive jobs; skilled labor; modernization of educational programs; unprecedented polarization of producer types; exclusion, complexity, scarcity and the high costs of big Deep Learning models and Artificial intelligence; vulnerability of the privacy and security of data; technological dependence; environmental impact resulting from digitalization and robotics; reduction of traditional agriculture; oligopolistic markets for a global food production order; and loss of sovereignty in food production (Ahmad and Nabi, 2021; Martos *et al.*, 2021; Buka *et al.*, 2022; Espinosa Cortés, 2022; FAO, 2022; Kato-Maldonado and Huerta- Moreno, 2022).

These and other challenges that may arise in the future and have not been identified at present, shall reduce maize supply to satisfy the apparent consumption of this staple in Mexico (63.16 M Mg; FAO, 2023) due to the demand of the estimated 144 million people that would be here in 2050 (ONU, 2023). Consequently, for 2050 an increase of 8.99 M

Mg in imports will be required, compared to 2020; this value will be equivalent to a 6-fold increase on what was demanded in 1990. Further domestic demand will cause exports to a 0.682 M Mg increase in maize grain production, compared to values today (FAO, 2023).

4.5 CONCLUSIONS

Maize is one of the most important grains in world agriculture production. The United States, China and Brazil focus their resources on yield and production increases in the future. In Mexico, maize grain production was deficient to meet current demand, so there is dependence on the imports of yellow maize grain from the United States.

According to the 2050 forecasting scenario, maize grain production in Mexico may increase due to education, development, and adoption of advanced Agriculture 5.0 technologies. But it will not be enough to meet domestic demands, for it is predicted that imports of yellow maize grain will still be needed. Agricultural public policies adapted to each region and type of producer are required to go beyond the short term, in order to design sustainable and resilient production systems that guarantee food sovereignty, restoration of natural resources and conservation of native maize varieties.

4.6 ACKNOWLEDGEMENTS

Javier Medina-Hernandez, the author, acknowledges the Mexico's National Council of Humanities, Sciences and Technologies (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías - CONAHCyT) for the funds granted through scholarship Nu. 884488.

4.7 REFERENCES

- Abbasimehr, H.; Shabani, M.; Yousefi, M. 2020. An optimized model using LSTM network for demand forecasting. *Computers and Industrial Engineering*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106435>
- Ahmad, L.; Nabi, F. 2021. Agriculture 5.0: Artificial Intelligence, IoT and Machine Learning. CRC Press.
- Aladag, C. H. 2017. Advances in Time Series Forecasting. Bentham Science Publishers. Vol. 2. <https://doi.org/10.2174/97816810852891170201>
- Buka, S.; Tkachuk, V.; Kondratiuk, V.; Tonkha, O.; Slobodyanyuk, N. 2022. Prospects for agribusiness in Ukraine over the next 5 years. *International Journal of Environmental Studies*, 1-8. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2157630>
- Cadet-Díaz, S.; Guerrero-Escobar, S. 2018. Factores que determinan los rendimientos de la producción de maíz en México: evidencia del censo agropecuario 2007. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 15(3). <https://doi.org/10.22231/asyd.v15i3.848>
- CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación). 2023. Medición de la pobreza 2022. https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2022.aspx
- Espinosa Cortés, L. M. 2022. Hegemonía de Estados Unidos en el orden agroalimentario mundial y la pérdida de la autosuficiencia alimentaria de México. *CIENCIA Ergo-Sum*, 29(1). <https://doi.org/10.30878/ces.v29n1a4>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2022. The Future of food and agriculture - Drivers and triggers for transformation. In: The Future of Food and Agriculture, no. 3. FAO Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/cc0959en>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2023. FAOSTAT: Food and agriculture data. <http://www.fao.org/faostat/en/>
- Greff, K.; Srivastava, R. K.; Koutník, J.; Steunebrink, B. R.; Schmidhuber, J. 2017. LSTM: A search space odyssey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 28(10), 2222–2232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582924>
- Kato-Maldonado, L.; Huerta-Moreno, G. 2022. Carencia alimentaria, cadenas productivas y políticas públicas para el sector agrícola en México. *Economía, Población y Desarrollo*, 12(67). <https://doi.org/10.20983/epd.2022.67.1>

- López-Torres, B. J.; Rendón-Medel, R.; Camacho Villa, T. C. 2016. La comercialización de los maíces de especialidad en México: condiciones actuales y perspectivas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i15.427>
- Martos, V.; Ahmad, A.; Cartujo, P.; Ordoñez, J. 2021. Ensuring Agricultural Sustainability through Remote Sensing in the Era of Agriculture 5.0. *Applied Sciences*, 11(13), 5911. <https://doi.org/10.3390/app11135911>
- Mills, T. C. 2019. *Applied Time Series Analysis: A Practical Guide to Modeling and Forecasting*. Elsevier. Academic press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03956-6>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2023. World Population Prospects 2022. Disponible en <https://population.un.org/wpp/>
- Sánchez-Ramírez, F. J.; Rincón-Sánchez, F.; Ruiz Torres, N. A.; Sánchez-Sánchez, G. 2023. Agronomic characterization of pigmented native corn populations (*Zea mays* L.). *Agro Productividad*, 16(8), 3-10. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i7.2159>
- Shahini, E.; Skuraj, E.; Sallaku, F.; Shahini, S. 2022. The supply shock in organic fertilizers for agriculture caused by the effect of Russia-Ukraine war. *Наукові Горизонти*, 25(2), 97-103. [https://doi.org/10.48077/scihor.25\(2\).2022.97-103](https://doi.org/10.48077/scihor.25(2).2022.97-103)
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2023a. Balanzas disponibilidad consumo de principales granos. <https://www.gob.mx/siap/documentos/balanzas-disponibilidad-consumo-de-productos-agropecuarios-seleccionados-104471>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2023b. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta [SIACON]. <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>



CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES

Los desafíos globales del futuro son diversos y afectarán a los países de manera única. Para enfrentar estos retos a largo plazo, se prevé la llegada de una nueva Revolución Artificial Inteligente, que transformará profundamente los sectores económicos y sociales, con efectos que, aunque difíciles de anticipar en su totalidad, serán evidentes hacia el año 2050. En el Sector Agropecuario, esta transformación se manifestará a través de la Agricultura 5.0, la quinta Revolución Agrícola mundial, caracterizada por la integración avanzada de tecnologías, con la Inteligencia Artificial General (AGI), como elemento central.

La Inteligencia Artificial General será el núcleo del sistema agroalimentario global, optimizando de manera integral la producción, distribución y consumo de alimentos. Este avance tecnológico tiene como objetivo mejorar la eficiencia del Sector Agropecuario, permitiendo una gestión más precisa de los recursos y una mayor adaptabilidad ante los desafíos globales, como el cambio climático y el crecimiento demográfico que afectarán a los cultivos dominantes. Además, la AGI jugará un papel clave en la búsqueda de la soberanía alimentaria, centrándose en las grandes potencias y las empresas líderes en su desarrollo.

En este contexto de desafíos globales, México está en proceso de transformación significativa en sus sistemas de producción agrícola, debido a la adopción de tecnologías avanzadas y por la necesidad de gestionar de manera más eficiente sus medios de producción. Este cambio afectará principalmente a los grandes productores, quienes, gracias a su acceso a financiamiento, infraestructura, mano de obra especializada y mercados de exportación, podrán implementar las innovaciones tecnológicas que optimicen sus procesos productivos.

Esta adopción tecnológica avanzada se centrará en la gestión sostenible de los recursos escasos, como la tierra agrícola, el agua y la biodiversidad, con el objetivo de maximizar la productividad y minimizar el impacto ambiental, asegurando la recuperación de los recursos vitales a largo plazo.

Por otro lado, los pequeños y medianos productores también podrán beneficiarse de los avances de la Agricultura 5.0. Estas tecnologías emergentes les permitirán mantener sus prácticas tradicionales, al mismo tiempo que protegen sus sistemas agroecológicos, los cultivos nativos y la biodiversidad. Así, la integración de la tecnología en la agricultura tradicional también favorecerá un aumento, aunque menor, de la productividad y la sostenibilidad ecológica y cultural de los actores clave más necesitados en la agricultura mexicana.

Hacia el año 2050, el Sector Agropecuario de México enfrentará desafíos significativos, impulsados principalmente por la Agricultura 5.0, la crisis climática y el crecimiento demográfico. Uno de los retos más destacados será el aumento en la demanda de alimentos, derivado del incremento poblacional, que alcanzará su punto máximo entre las décadas de 2050 y 2060. A este panorama se sumarán otros problemas como el desempleo masivo, las migraciones forzadas, las tensiones geopolíticas y la obsolescencia de los programas educativos actuales, que no estarán alineados con las nuevas necesidades del sector.

Adicionalmente, las nuevas tecnologías, aunque necesarias, podrían generar impactos adversos, como la contaminación ambiental derivado de su uso intensivo y una alta dependencia de tecnologías extranjeras, lo que agravaría la vulnerabilidad del sistema agropecuario mexicano. Además, si las instituciones de investigación no logran adaptarse con rapidez, podrían quedar rezagadas, limitando el desarrollo científico necesario para enfrentar estos retos. Otros factores críticos incluirán el aumento de la inseguridad, aparición de pandemias, desastres naturales más intensos, desabasto de insumos importados y otros aún no identificados. Las políticas públicas agrícolas obsoletas e ineficientes deberán ser reformuladas para responder eficazmente a este complejo panorama.

La próxima Revolución Agrícola Superinteligente, donde la Agricultura 5.0 tiene el potencial de ofrecer soluciones a los múltiples desafíos que enfrenta el Sector Agropecuario mexicano, su impacto será significativo en los tres tipos de productores: grandes, medianos y pequeños. Sin embargo, el éxito de esta transformación dependerá en gran medida de la creación e implementación de

un esquema estratégico de políticas públicas que se adapte a las dinámicas cambiantes de cada región y a las necesidades específicas de cada tipo de productor. Este enfoque flexible será crucial para maximizar los beneficios de la Agricultura 5.0.

Una de las características distintivas de la Agricultura 5.0 con respecto a las otras revoluciones agrícolas, es la capacidad de una alta personalización que se logrará en los sistemas de producción, tanto en México como en el resto del mundo. Esta capacidad de adaptación será clave para ofrecer soluciones específicas y optimizadas para cada agricultor, ganadero o silvicultor. En este sentido, los esfuerzos deberán centrarse en maximizar esta personalización, permitiendo a los actores clave, mejorar su productividad de manera sostenible y eficiente como nunca se había concebido. Esta nueva era tecnológica promete transformar la agricultura, la ganadería y la silvicultura, adaptándose a los retos locales y globales del futuro.

Las instituciones de investigación y educación, especialmente las universidades como la Universidad Autónoma Chapingo, desempeñarán un papel crucial en la adopción de tecnologías avanzadas asociadas con la Agricultura 5.0 en México. Estas instituciones serán responsables de transferir conocimientos e innovaciones a los productores de diversas regiones del país, facilitando la integración de nuevas herramientas tecnológicas en los sistemas agrícolas locales. Los extensionistas del siglo XXI, formados en estas instituciones, estarán capacitados con sistemas de inteligencia artificial avanzada, lo que les permitirá abordar los desafíos y proponer soluciones a corto, mediano y largo plazo.

Además de su papel en la transferencia tecnológica, las instituciones de educación superior tendrán la responsabilidad de promover la conservación de variedades nativas, esenciales para el mejoramiento de los cultivos dominantes, como el maíz grano. También se centrarán en la protección de los métodos de producción tradicionales, la biodiversidad y los recursos naturales, que serán aún más escasos hacia el año 2050. La efectividad de la Agricultura 5.0 se verá profundamente influenciada por la capacidad de estas instituciones y de los

extensionistas del siglo XXI para adaptarse y liderar la innovación en un ámbito agrícola cada vez más complejo y desafiante.

Lo que antes se consideraba un avance tecnológico del futuro lejano, ahora forma parte de nuestra realidad cotidiana. Investigadores, estudiantes, tomadores de decisiones y productores, en todos los niveles, están experimentando los efectos transformadores de la Agricultura 5.0, y se espera que su impacto global se acelere en los próximos años. Es en este contexto que México, un país con una rica historia agrícola y un panorama socioeconómico complejo, estará preparado para desempeñar un papel importante en la evolución global de la agricultura, siempre y cuando se anticipen las soluciones necesarias a los retos futuros descritos en la presente investigación.

Dada la magnitud de estos cambios, ninguna región o Sector Agropecuario podrá quedar al margen de sus implicaciones. Por lo tanto, es fundamental que estemos preparados para abordar estos desafíos de manera proactiva, adoptando estrategias que permitan una adaptación rápida y efectiva a este nuevo paradigma tecnológico. Sin embargo, los efectos completos de esta revolución tecnológica aún están por definirse, lo que resalta la necesidad de un análisis continuo y adaptaciones estratégicas permanentes.

5.1 RECOMENDACIONES

Se reconoce la complejidad global inherente a esta investigación, lo que subraya la importancia de continuar el estudio de los cultivos y productos agropecuarios dominantes tanto en México como a nivel mundial.

Asimismo, es fundamental analizar cómo las tecnologías de vanguardia de la nueva Revolución Agrícola Superinteligente afectarán a los distintos tipos de productores en las diversas regiones del país.

La tarea es extensa, pero mediante la colaboración de todos los actores involucrados, será posible promover el desarrollo sostenible del Sector Agropecuario en México, con una visión a largo plazo.

Sin embargo, los cambios tecnológicos y ambientales están ocurriendo a una velocidad sin precedentes, por lo que es crucial prepararse para adaptarse a este ritmo o, de lo contrario, correremos el riesgo de quedar rezagados en este proceso de transformación llamado Agricultura 5.0.

APÉNDICES

Publicaciones y difusión científica

1.- IV Seminario Internacional de Economía y Desarrollo: Problemas del Crecimiento Económico en América Latina y El Caribe



2.- XII Congreso Internacional y XXVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas (CINCA)



3.- XII Congreso Internacional y XXVI Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas (CINCA)



4.- III Seminario Internacional de Economía y Desarrollo: Problemas del Crecimiento Económico en América Latina y El Caribe



Universidad Autónoma Chapingo
División de Ciencias Económico-Administrativas
Centro de Investigación y Servicio en Economía y Comercio Agropecuario
Universidad Autónoma del Estado de México
Centro de Estudios e Investigación en Desarrollo Sustentable
Cuerpo Académico en Desarrollo Sustentable, Sociedad y Ambiente



Otorgan la presente

Constancia

Al C. Javier Medina Hernández

Por su valiosa participación con la Ponencia titulada:

"DESAFÍOS ACTUALES Y PRONÓSTICOS DE LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE MAÍZ EN MÉXICO"

Presentada en el III Seminario Internacional de Economía y Desarrollo,
realizado en la DICEA, los días 28 y 29 de septiembre de 2023.

Cuyos autores son: **Javier Medina Hernández, Ignacio Caamal Cauich, Verna Gricel Pat Fernández y José Ávila Dorantes**

Dr. Ignacio Caamal Cauich
Coordinador del CISECA

Chapingo, México, a 28 de septiembre de 2023.



5.- Ponencia en el Módulo Aprendizaje de Máquina para Modelado de Datos en la Universidad Anáhuac Online



Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a:

Javier Medina Hernández

por su destacada participación con la ponencia

"Proyecciones hasta el año 2100 de variables clave en el sector forestal de México y su análisis en la política pública".

En el módulo: Aprendizaje de máquina para modelado de datos .

Act. Abraham Cárdenas González
Director Anáhuac Online

Dr. Rafael Estrada Danell
Director Académico Anáhuac Online

Marzo de 2023.

Huixquilucan, Estado de México.

*¿Podremos vivir otros 10 mil años
mejorando la agricultura?*

O

*¿Ya no tendrá sentido
gracias a nuestra próxima gran
evolución?*

...

¿Cyborgs?

¿Transhumanos?

¿H+?

¿Posthumanos?

¿Hiperinteligencias?

¿Seres Singulares?

O

¿Volverá a iniciar el ciclo?

Javier Medina Hernández, 2024.

FIN

