



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – ECONOMÍA DE LA ENERGÍA

ENERGÍA Y AGUA EN LA AGROINDUSTRIA DEL MAÍZ EN MÉXICO:
CARACTERIZACIÓN DE SUS CONSUMOS Y POTENCIAL DE AHORRO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
SERGIO JUÁREZ HERNÁNDEZ

TUTORA PRINCIPAL
Dra. Claudia Sheinbaum Pardo – Instituto de Ingeniería, UNAM

COMITÉ TUTOR
Dra. L. Patricia Güereca Hernández – Instituto de Ingeniería, UNAM
Dr. Omar R. Masera Cerutti – Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad,
UNAM
Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros – División del Agua y Programa Hidrológico Internacional,
UNESCO

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. Marzo 2019

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. José Luis Fernández Zayas

Secretario: Dr. Omar R. Masera Cerutti

Vocal: Dra. Claudia Sheinbaum Pardo

1^{er}. Suplente: Dr. Juan José Ambriz García

2^{do}. Suplente: Dra. L. Patricia Güereca Hernández

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

TUTORA DE TESIS:

Dra. Claudia Sheinbaum Pardo

FIRMA

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

Resumen

El maíz es un cultivo estratégico y componente central de la dieta en México. En este trabajo se examinan los patrones de uso de energía y agua, así como algunos de sus impactos ambientales asociados, en los sectores principales de la agroindustria del maíz. El trabajo está organizado como una colección de artículos en los que se abordan los aspectos mencionados. La relevancia del problema de investigación y los objetivos del trabajo se describen en el Capítulo I. Luego, en el Capítulo II, se reportan el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la agroindustria del maíz blanco a escala nacional. El uso total de energía en la agroindustria del maíz blanco ascendió a 123.3 – 217.3 PJ. La producción de maíz y la elaboración mecanizada de tortilla fueron las actividades más intensivas en energía. Las emisiones totales de GEI alcanzaron 9.0 – 16.5 Tg-CO₂eq, de las cuales la elaboración mecanizada de tortilla y la producción de maíz aportaron la mayor proporción. Enseguida, en el Capítulo III, se calculan los requerimientos de agua de riego, el uso de energía para riego y las emisiones asociadas de GEI de diferentes sistemas de producción de maíz bajo riego. Los promedios ponderados de requerimientos de agua de riego, uso de energía para riego, y emisiones de GEI asociadas fluctuaron entre 228.7 y 1,068.2 mm, 1.0 y 31.6 GJ ha⁻¹ y 62.0 y 2,019.9 kg-CO₂e ha⁻¹, respectivamente, mientras que las cifras a nivel nacional ascendieron a 4.7 km³, 4.8 PJ, y 305.2 Gg-CO₂e. El uso de energía, el consumo acumulado de exergía (CExC), y las emisiones de GEI de siete sistemas de producción de maíz se cuantifican en el Capítulo IV. Considerando los valores promedio calculados, el uso de energía por hectárea, la intensidad energética, el cociente energía obtenida - energía usada, y la energía neta se ubicaron en los rangos de 2.3 – 40.2 GJ ha⁻¹, 1.8 – 8.5 MJ kg⁻¹ de grano, 1.7 – 12.0, y 16.3 – 73.1 GJ ha⁻¹, respectivamente. El CExC por hectárea, la intensidad exergética, el cociente exergía obtenida - exergía consumida, y la exergía neta se estimaron entre 2.5 – 52.1 GJ ha⁻¹, 1.9 – 10.7 MJ kg⁻¹ de grano, 1.6 – 14.1, y 19.6 – 86.8 GJ ha⁻¹, respectivamente. Las emisiones de GEI por hectárea, la intensidad de GEI, y las emisiones de GEI por unidad de energía usada se calcularon entre 152.9 – 3,475.8 kg-CO₂e ha⁻¹, 116.5 – 601.9 kg-CO₂e Mg⁻¹ de grano, y 63.1 – 117.2 kg-CO₂e GJ⁻¹, respectivamente. Los rangos tan amplios pueden explicarse por la variabilidad en las prácticas de manejo y en los rendimientos de los sistemas de producción de maíz. En el Capítulo V se evalúan las posibilidades de reducción de la demanda de agua de riego, el uso de energía, y las emisiones de GEI en sistemas convencionales de producción de maíz como resultado de la adopción de prácticas agrícolas alternativas relacionadas con el manejo del suelo, de los nutrientes, y del agua de riego. El uso de energía por kg de maíz varió entre -20% y +33%, las emisiones de GEI por kg de grano entre -14% y +14%, y la cantidad de grano producido por m³ de agua de riego aplicado entre +12% y +88%. La sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol o abono verde y la mejora de la eficiencia de uso del fertilizante N sintético proporcionaron las reducciones más sustantivas en el uso de energía. La mejora de la eficiencia de uso del fertilizante N sintético reportó las disminuciones más notorias en las emisiones de GEI. La conversión a riego presurizado y el cambio a métodos de labranza de conservación produjeron los incrementos más importantes en la eficiencia de uso del agua de riego. El consumo de agua, el uso de energía, y las emisiones de GEI de origen energético de la fabricación industrial de harina de maíz nixtamalizado (HMN) se calculan en el Capítulo VI con base en un proceso simplificado genérico de producción de HMN. Las operaciones unitarias investigadas fueron pre-cocimiento alcalino, lavado mecanizado, pre-acondicionamiento, primera y segunda molienda, secado, enfriamiento, y cernido y clasificación. Por tonelada métrica de HMN elaborada, el consumo total de agua se estimó en 2.4 m³, el uso total de energía en 3.0 GJ, y las emisiones totales de GEI en 199.6 kg-CO₂e. El lavado de los granos de maíz pre-cocidos fue la operación unitaria más demandante de agua, en tanto que el secado fue la más intensiva en energía y emisiones de GEI. Entonces, las intervenciones orientadas a reducir las demandas de agua y energía y las emisiones de GEI deberían enfocarse en dichas operaciones. Las conclusiones generales se desarrollan en el Capítulo VII.

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

Abstract

Maize is a key food crop in Mexico and is central to the diet of the Mexican people. The present dissertation examines the energy and water use patterns, and some of their associated environmental impacts, in the maize agro-industry. The dissertation is organized as a collection of manuscripts, each dealing with a particular aspect of the problem investigated. The relevance and the objectives of the research are elaborated in Chapter I. Then, Chapter II reports estimated country-scale energy use and greenhouse gas emissions (GHG) from the white maize agro-industry in Mexico. Total energy use in the white maize agro-industry was in the range 123.3 – 217.3 PJ. Maize farming and mechanical tortilla production were the most energy-intensive activities. Total GHG emissions amounted to 9.0 – 16.5 Tg-CO₂e, with mechanical tortilla production and maize farming contributing the largest proportion. Next, in Chapter III, irrigation water requirements, irrigation energy use, and associated GHG emissions from different irrigated maize production systems are calculated. Weighted average per-hectare irrigation water requirements, irrigation energy use, and associated GHG emissions were in the region of 228.7 – 1,068.2 mm, 1.0 – 31.6 GJ ha⁻¹ and 62.0 – 2,019.9 kg-CO₂e ha⁻¹, respectively, while country-scale estimates amounted to about 4.7 km³, 4.8 PJ, and 305.2 Gg-CO₂e. Energy use, cumulative exergy consumption (CExC), and GHG emissions from seven different maize production systems are quantified in Chapter IV. Considering computed average values, per-hectare energy use, energy intensity, energy output – input ratio, and net energy fluctuated between 2.3 – 40.2 GJ ha⁻¹, 1.8 – 8.5 MJ kg⁻¹ of grain, 1.7 – 12.0, and 16.3 – 73.1 GJ ha⁻¹, respectively. Per-hectare CExC, exergy intensity, exergy output – input ratio, and net exergy varied between 2.5 – 52.1 GJ ha⁻¹, 1.9 – 10.7 MJ kg⁻¹ of grain, 1.6 – 14.1, and 19.6 – 86.8 GJ ha⁻¹, respectively. Per-hectare GHG emissions, GHG intensity, and GHG per unit energy input were in the range of 152.9 – 3,475.8 kg-CO₂e ha⁻¹, 116.5 – 601.9 kg-CO₂e Mg⁻¹ of grain, and 63.1 – 117.2 kg-CO₂e GJ⁻¹, respectively. The wide ranges can be explained by the large variability in management practices and grain yields of the maize production systems investigated. Then, Chapter V evaluates possible reductions in irrigation water demand, total energy use, and total GHG emissions from conventional maize production systems due to the adoption of alternative farming practices related to soil, nutrient, and irrigation water management. Energy use per unit mass of grain produced varied from -20% to +33%, GHG emissions per unit mass of grain from -14% to +14%, and the amount of grain produced per unit volume of applied irrigation water from +12% to +88%. Partial substitution of synthetic N fertilizer with animal manure or legume green manure and improved synthetic N fertilizer use efficiency brought the largest potential savings in energy use. Improving synthetic N fertilizer use efficiency also provided the greatest possible reductions in GHG emissions. Switching to pressurized irrigation and conservation tillage methods resulted in the most significant increases in irrigation water use efficiency. Fresh water requirements, energy use, and energy-derived GHG emissions from alkaline-cooked maize dry masa flour (ADMF) manufacturing are computed in Chapter VI based on a simplified generic ADMF production process. Unit operations included alkaline pre-cooking, mechanical washing, pre-conditioning, first and second milling, drying, cooling, and sifting and classifying. Per metric ton of ADMF produced, total fresh water requirements reached around 2.4 m³, total energy use 3.0 GJ, and total GHG emissions 199.6 kg-CO₂e. Washing of pre-cooked maize kernels was the most water-demanding unit operation while drying was the most energy- and GHG-intensive unit operation. Thus, interventions to minimize water and energy requirements and mitigate GHG emissions should be aimed preferably at such unit operations. General conclusions are given in Chapter VII.

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

Publicaciones originales

Los capítulos de esta tesis derivan de las siguientes publicaciones:

- Juárez-Hernández, S., Usón, S., Sheinbaum, C., 2019. Assessing maize production systems in Mexico from an energy, exergy, and greenhouse gas emissions perspective, *Energy*, 170:199-211.
- Juárez-Hernández, S., Sheinbaum, C., 2018. Energy-, irrigation water-, and greenhouse gas emission-reduction potentials of alternative farming practices in conventional maize systems in Mexico, sometido a *Energy for Sustainable Development*.
- Juárez-Hernández, S., Sheinbaum, C. 2018. Irrigation energy use and related greenhouse gas emissions of maize production in Mexico, *International Journal of Water Resources Development*, DOI: 10.1080/07900627.2018.1482739.
- Juárez-Hernández, S., Sheinbaum, C., 2016. Energy use and CO₂ emissions of the Mexican white maize agroindustry. 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impacts of Energy Systems, 19 – 23 de junio, Portoroz, Eslovenia.

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

Índice

I. Introducción y objetivo.....	27
II. Estimación del uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero de la agroindustria del maíz blanco en México.....	31
II.1 Introducción.....	31
II.2 Metodología y fuentes de información.....	33
II.3 Resultados y discusión.....	37
II.3.1 Flujos de oferta y demanda de maíz grano blanco.....	37
II.3.2 Uso de energía en la producción nacional de maíz grano blanco.....	38
II.3.3 Uso de energía en el transporte de maíz grano blanco.....	39
II.3.4 Uso de energía en el almacenamiento y la conservación del maíz grano blanco.....	40
II.3.5 Uso de energía en el procesamiento del maíz grano blanco.....	40
II.3.5.1 Producción tradicional de masa de nixtamal.....	40
II.3.5.2 Producción de harina de maíz nixtamalizado.....	41
II.3.5.3 Producción comercial mecanizada de tortilla de maíz.....	42
II.3.6 Uso total de energía en la agroindustria del maíz blanco en México.....	43
II.3.7 Emisiones de GEI de la agroindustria del maíz blanco en México.....	44
II.4 Conclusiones.....	45
II.5 Referencias.....	47
III. Uso de energía para riego y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas en la producción de maíz de riego en México.....	51
III.1 Introducción.....	51
III.2 Metodología y fuentes de información.....	52
III.2.1 Sistemas de producción de maíz con riego.....	52
III.2.2 Superficie sembrada y características técnicas principales de los sistemas de producción de maíz con riego.....	53

III.2.3 Requerimientos de agua de riego.....	54
III.2.4 Uso de energía para riego y emisiones de GEI asociadas.....	55
III.2.4.1 Aplicación del agua de riego a los campos de cultivo.....	55
III.2.4.2 Extracción de agua de riego de pozo profundo.....	57
III.2.5 Análisis de sensibilidad.....	58
III.3 Resultados y discusión.....	58
III.3.1 Superficie sembrada por sistema de producción de maíz con riego.....	58
III.3.2 Características técnicas principales de los sistemas de producción de maíz con riego.....	59
III.3.3 Requerimientos de agua para riego.....	64
III.3.4 Uso de energía para riego y emisiones de GEI asociadas.....	64
III.3.4.1 Sistemas de producción de maíz con riego por gravedad.....	64
III.3.4.2 Sistemas de producción de maíz con riego presurizado.....	67
III.3.5 Estimados a escala nacional.....	69
III.3.6 Análisis de sensibilidad.....	72
III.3.7 Implicaciones de política pública.....	73
III.3.8 Limitaciones del estudio.....	75
III.4 Conclusiones.....	76
III.5 Referencias.....	77
IV. Evaluación de los sistemas de producción de maíz en México desde las perspectivas energética, exergética, y de emisiones de gases de efecto invernadero.....	81
IV.1 Introducción.....	81
IV.2. Metodología y fuentes de información.....	83
IV.2.1 Sistemas de producción de maíz.....	83
IV.2.2 Insumos y operaciones agrícolas.....	83
IV.2.3 Fronteras del sistema.....	85

IV.2.4 Estimación del uso de energía.....	88
IV.2.4.1 Uso indirecto de energía.....	88
IV.2.4.2 Uso directo de energía.....	92
IV.2.5 Estimación del consumo de exergía.....	94
IV.2.5.1 Consumo indirecto de exergía.....	94
IV.2.5.2 Consumo directo de exergía.....	95
IV.2.6 Estimación de las emisiones de GEI.....	95
IV.2.6.1 Emisiones indirectas de GEI.....	95
IV.2.6.2 Emisiones directas de GEI.....	98
IV.2.7 Análisis de incertidumbre.....	99
IV.2.8 Estimaciones a nivel nacional.....	99
IV.3 Resultados.....	100
IV.3.1 Uso de energía.....	100
IV.3.2 Consumo acumulado de exergía.....	104
IV.3.3 Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero.....	108
IV.3.4 Estimados a escala nacional.....	112
IV.4. Discusión.....	115
IV.5. Conclusiones.....	118
IV.6 Referencias.....	119
V. Potencial de reducción de uso de energía, demanda de agua de riego, y emisiones de gases de efecto invernadero por la adopción de prácticas agrícolas alternativas en sistemas convencionales de producción de maíz en México.....	125
V.1 Introducción.....	125
V.2 Metodología y fuentes de información.....	127
V.2.1 Sistemas de producción de maíz.....	127
V.2.1.1 Sistema de producción TCF.....	128

V.2.1.2 Sistema de producción TMF.....	128
V.2.1.3 Sistema de producción GMF.....	128
V.2.1.4 Sistema de producción BMF.....	129
V.2.2 Estimación del uso de energía.....	130
V.2.3 Estimación de las emisiones de GEI.....	131
V.2.4 Estimación del volumen de agua de riego aplicada.....	135
V.2.5 Prácticas agrícolas alternativas.....	136
V.2.5.1 Adopción de métodos de labranza de conservación.....	136
V.2.5.2 Sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol.....	137
V.2.5.3 Sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde.....	137
V.2.5.4 Mejora en la eficiencia del uso del fertilizante N sintético.....	138
V.2.5.5 Conversión a riego presurizado.....	138
V.2.5.6 Aplicación de riego deficitario.....	139
V.2.6 Posibles efectos en los rendimientos de producción de maíz grano.....	139
V.2.7 Análisis de sensibilidad.....	139
V.3. Resultados.....	140
V.3.1 Reducciones potenciales en el sistema de producción TCF.....	140
V.3.2 Reducciones potenciales en el sistema de producción TMF.....	142
V.3.3 Reducciones potenciales en el sistema de producción GMF.....	144
V.3.4 Reducciones potenciales en el sistema de producción BMF.....	146
V.4. Discusión.....	149
V.5. Limitaciones del estudio.....	157
V.6. Conclusiones.....	158
V.7 Referencias.....	159

VI. Estimación del consumo de agua, uso de energía, y emisiones de gases de efecto invernadero de origen energético de la producción industrial de harina de maíz nixtamalizado.....	167
VI.1 Introducción.....	168
VI.2 Metodología y fuentes de información.....	170
VI.2.1 Descripción del proceso.....	171
VI.2.2 Suposiciones de cálculo.....	172
VI.2.3 Balances de materia y energía.....	176
VI.2.4 Estimación de las emisiones de GEI.....	179
VI.3 Resultados.....	179
VI.4. Discusión.....	185
VI.5. Limitaciones del estudio.....	189
VI.6 Conclusiones.....	189
VI.7 Referencias.....	190
VII. Conclusiones generales.....	195

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

Índice de Tablas

Tabla II.1. Insumos energéticos por hectárea sembrada en algunos de los sistemas de producción de maíz grano en México según distintas fuentes.....	35
Tabla II.2. Estructura modal y distancia de transporte promedio ponderada estimadas para el transporte interno de maíz grano blanco.....	36
Tabla II.3. Flujos estimados de oferta y demanda de maíz grano blanco en México.....	38
Tabla II.4. Insumos energéticos estimados para la producción nacional de maíz grano blanco.....	39
Tabla III.1. Sistemas de producción de maíz con riego.....	53
Tabla III.2. Valores típicos de la presión de operación (P_{op}), pérdidas de presión (P_{per}), eficiencia de aplicación (e_a), y mano de obra asociadas a los métodos de riego presurizado.....	56
Tabla III.3. Energía y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la fabricación de equipo para riego presurizado.....	57
Tabla III.4. Superficie sembrada total estimada por sistema de producción de maíz de riego y ciclo de producción (año agrícola 2006-2007).....	59
Tabla III.5. Superficie sembrada estimada por sistema de producción de maíz con riego y entidad federativa para el ciclo de producción primavera – verano.....	60
Tabla III.6. Superficie sembrada estimada por sistema de producción de maíz con riego y entidad federativa para el ciclo de producción otoño - invierno.....	61
Tabla III.7. Uso relativo estimado a nivel nacional de canales recubiertos y canales de tierra en la superficie sembrada bajo los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad.....	62
Tabla III.8. Uso relativo estimado a nivel nacional de los métodos de riego presurizado en la superficie sembrada bajo los sistemas de producción de maíz con riego por bombeo.....	62
Tabla III.9. Uso relativo estimado a nivel nacional de las fuentes de agua para riego por sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.....	63
Tabla III.10. Uso relativo estimado a nivel nacional de los tipos de agua para riego por sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.....	64
Tabla III.11. Evapotranspiración del maíz (ET_c), precipitación efectiva (P_{ef}) y requerimientos netos de agua de riego (NI_{req}) promedio estimados a nivel estatal por estado de la República y ciclo de producción.....	65

Tabla III.12. Promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) de los requerimientos brutos de agua de riego (I_{bruto}) y del agua de riego aplicada (I) por hectárea para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.....	66
Tabla III.13. Promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) del uso total de energía para riego por hectárea y por unidad de volumen de agua de riego aplicada ($IrrE_s$) para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.....	67
Tabla III.14. Promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) de las emisiones de GEI totales asociadas al uso de energía para riego por hectárea y por unidad de volumen de agua de riego aplicada ($IrrGEI_s$) para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.....	68
Tabla III.15. Requerimientos brutos de agua para riego (I_{bruto}) y volumen de agua de riego aplicada (I) estimados a nivel nacional para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.....	70
Tabla III.16. Uso de energía y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas estimados a nivel nacional para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.....	71
Tabla III.17. Productividad del agua de riego (PAR) estimada de los sistemas de producción de maíz con riego cuya información sobre rendimiento de producción estuvo disponible.....	72
Tabla IV.1. Sistemas de producción de maíz según la tipología de sistemas agrícolas.....	84
Tabla IV.2. Sistemas de producción de maíz y entidades federativas cuyos costos de producción de maíz grano fueron usados en el presente análisis.....	85
Tabla IV.3. Rango y promedio de las dosis de aplicación por hectárea de los insumos agrícolas en los sistemas de producción de maíz grano de temporal según información reportada para el ciclo de producción primavera – verano.....	86
Tabla IV.4. Rango y promedio de las dosis de aplicación por hectárea de los insumos agrícolas en los sistemas de producción de maíz con riego según información reportada.....	87
Tabla IV.5. Uso de energía y consumo acumulado de exergía ($CExC$) asociado a la fabricación de insumos agrícolas.....	89
Tabla IV.6. Uso estimado de diésel en las operaciones agrícolas mecanizadas y energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) embutidas en la maquinaria agrícola utilizada en cada operación.....	91
Tabla IV.7. Uso de energía y consumo acumulado de exergía ($CExC$) estimados en el transporte y la distribución de insumos agrícolas.....	92
Tabla IV.8. Energía humana estimada asociada a las operaciones agrícolas manuales.....	93

Tabla IV.9. Energía animal estimada asociada a las operaciones agrícolas realizadas con animales de tiro.....	93
Tabla IV.10. Factores de emisión de gases de efecto invernadero estimados para los insumos agrícolas.....	96
Tabla IV.11. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) estimadas para el uso de combustibles fósiles en el transporte y distribución de insumos agrícolas.....	97
Tabla IV.12. Rango y promedio de los valores estimados del uso total de energía por hectárea, participación de los usos directos e indirectos de energía, intensidad energética (<i>EI</i>), energía neta (<i>NE</i>) y cociente energía obtenida – energía usada (<i>ER</i>) de los sistemas de producción de maíz seleccionados.....	101
Tabla IV.13. Estimados del uso total de energía por hectárea, intensidad energética (<i>EI</i>), energía neta (<i>NE</i>), cociente energía obtenida – energía usada (<i>ER</i>) para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible.....	102
Tabla IV.14. Rango y promedio de los valores estimados del consumo acumulado de exergía (<i>CExC</i>) por hectárea, participación de los consumos directos e indirectos de exergía, intensidad exergética (<i>ExI</i>), exergía neta (<i>NEx</i>), y cociente exergía obtenida – exergía consumida (<i>ExR</i>) de los sistemas de producción de maíz seleccionados.....	105
Tabla IV.15. Estimados del consumo acumulado de exergía (<i>CExC</i>) por hectárea, intensidad exergética (<i>ExI</i>), exergía neta (<i>NEx</i>), y cociente exergía obtenida – exergía consumida (<i>ExR</i>) para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible.....	106
Tabla IV.16. Rango y promedio de los valores estimados de las emisiones totales de GEI por hectárea, participación de las fuentes directas e indirectas de emisiones de GEI, intensidad de emisiones de GEI (<i>GEII</i>), y emisiones de GEI por unidad de energía utilizada (<i>GEIE_i</i>) de los sistemas de producción de maíz seleccionados.....	109
Tabla IV.17. Estimados de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) por hectárea, intensidad de emisiones de GEI (<i>GEII</i>), emisiones de GEI por unidad de energía utilizada (<i>GEIE_i</i>) para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible.....	110
Tabla IV.18. Incertidumbre relativa estimada en los valores promedio de uso total de energía por hectárea, intensidad energética (<i>EI</i>), energía neta (<i>NE</i>), cociente energía obtenida – energía usada (<i>ER</i>), consumo acumulado de exergía por hectárea (<i>CExC</i>), intensidad exergética (<i>ExI</i>), exergía neta (<i>NEx</i>), cociente exergía obtenida – exergía consumida (<i>ExR</i>), emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) por hectárea, intensidad de emisiones de GEI (<i>GEII</i>), y emisiones de GEI por unidad de energía usada (<i>GEIE_i</i>) para los sistemas de producción de maíz seleccionados.....	112
Tabla IV.19. Superficie sembrada bajo cada sistema de producción de maíz y estado de la República en el ciclo de producción primavera – verano.....	113
Tabla IV.20. Superficie sembrada bajo cada sistema de producción de maíz y estado de la República en el ciclo de producción otoño – invierno.....	114

Tabla V.1. Operaciones e insumos agrícolas y rendimiento de producción de grano por hectárea del sistema convencional de producción TCF en el estado de Puebla, México, para el ciclo de producción primavera – verano.....	128
Tabla V.2. Operaciones e insumos agrícolas y rendimiento de producción de grano por hectárea del sistema convencional de producción TMF en el estado de Jalisco, México, para el ciclo de producción primavera – verano.....	129
Tabla V.3. Operaciones e insumos agrícolas y rendimiento de producción de grano por hectárea del sistema convencional de producción GMF (riego por surcos) en el estado de Sinaloa, México, para el ciclo de producción otoño – invierno.....	130
Tabla V.4. Operaciones e insumos agrícolas y rendimiento de producción de grano por hectárea del sistema convencional de producción BMF (riego por goteo) en el estado de Zacatecas, México, para el ciclo de producción primavera – verano.....	131
Tabla V.5. Uso estimado de combustible en las operaciones agrícolas mecanizadas.....	132
Tabla V.6. Uso estimado de energía en la fabricación y transporte de los insumos agrícolas.....	133
Tabla V.7. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la fabricación y el transporte de los insumos agrícolas.....	134
Tabla V.8. Variables seleccionadas para el análisis de sensibilidad.....	140
Tabla V.9. Intensidad energética (<i>EI</i>), intensidad de emisiones de GEI (<i>GEII</i>), y productividad del agua de riego (<i>PAR</i>) estimadas para los sistemas de producción de maíz seleccionados en los escenarios convencional y de prácticas alternativas.....	149
Tabla V.10. Variación (%) en los rendimientos de producción de maíz grano por hectárea necesaria para cancelar los incrementos (decrementos) en la intensidad energética (<i>EI</i>), la intensidad de emisiones de GEI (<i>GEII</i>), y la productividad del agua de riego (<i>PAR</i>) en los diferentes escenarios de prácticas agrícolas alternativas.....	150
Tabla V.11. Resultados del análisis de sensibilidad de la intensidad energética (<i>EI</i>) de los sistemas de producción de maíz a variables seleccionadas.....	151
Tabla V.12. Resultados del análisis de sensibilidad de la intensidad de emisiones de GEI (<i>GEII</i>) de los sistemas de producción de maíz a variables seleccionadas.....	152
Tabla V.13. Resultados del análisis de sensibilidad de la productividad del agua de riego (<i>PAR</i>) de los sistemas de producción de maíz a variables seleccionadas.....	153
Tabla VI.1. Composición típica de la materia seca de los granos de maíz.....	174
Tabla VI.2. Distribución de tamaños de partículas estimada para la primera y segunda molienda y para la harina de maíz nixtamalizado.....	175
Tabla VI.3. Capacidades térmicas específicas a presión constante (c_p) como función de la temperatura.....	177

Tabla VI.4. Composición, temperatura (T), y entalpía (H) de las principales corrientes de proceso en la producción de harina de maíz nixtamalizado.....	184
--	-----

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

Índice de Figuras

Figura II.1. Sistema agroindustrial del maíz blanco en México.....	34
Figura II.2. Uso total de energía mínimo y máximo estimado para la agroindustria del maíz blanco en México.....	43
Figura II.3. Emisiones GEI totales mínimas y máximas estimadas de la agroindustria del maíz blanco en México.....	45
Figura III.1. Análisis de sensibilidad del uso total de energía para riego y las emisiones GEI totales asociadas por hectárea para los siguientes variables: Requerimientos netos de agua de riego, uso relativo de los métodos de riego, eficiencia global del sistema de bombeo, volumen de agua de riego aplicado al campo de cultivo, y uso de energía y emisiones de GEI asociados a la fabricación del equipo de riego.....	73
Figura IV.1. Representación de las fronteras del sistema donde se muestran los insumos directos e indirectos de energía y exergía, así como las fuentes directas e indirectas de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) consideradas.....	88
Figura IV.2. Uso total de energía por hectárea estimado para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible.....	103
Figura IV.3. Uso total promedio de energía por hectárea estimado para los sistemas de producción de maíz seleccionados y contribución de los distintos insumos energéticos.....	103
Figura IV.4. Consumo acumulado de exergía (CExC) por hectárea estimado para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible.....	107
Figura IV.5. Consumo acumulado de exergía (CExC) promedio por hectárea estimado para los sistemas de producción de maíz seleccionados y contribución de los distintos insumos exergéticos.....	107
Figura IV.6. Emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) por hectárea estimadas para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible.....	111
Figura IV.7. Emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) promedio por hectárea estimadas para los sistemas de producción de maíz seleccionados y contribución de las distintas fuentes de emisiones.....	111
Figura V.1. Uso total de energía por hectárea y contribución de los diferentes insumos energéticos estimados para el sistema de producción de maíz TCF con prácticas agrícolas convencionales, adopción de labranza cero, sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol, sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde, e incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético.....	141

Figura V.2. Emisiones totales de GEI por hectárea y contribución de las diferentes fuentes de emisiones estimadas para el sistema de producción TCF con prácticas agrícolas convencionales, adopción de labranza cero, sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol, sustitución parcial del fertilizante N sintético aplicado con abono verde, e incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético.....	141
Figura V.3. Uso total de energía por hectárea y contribución de los diferentes insumos energéticos estimados para el sistema de producción de maíz TMF con prácticas agrícolas convencionales, adopción de labranza cero, sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol, sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde, e incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético.....	142
Figura V.4. Emisiones totales de GEI por hectárea y contribución de las diferentes fuentes de emisiones estimadas para el sistema de producción TMF con prácticas agrícolas convencionales, adopción de labranza cero, sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol, sustitución parcial del fertilizante N sintético aplicado con abono verde, e incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético.....	143
Figura V.5. Uso total de energía por hectárea y contribución de los diferentes insumos energéticos estimados para el sistema de producción de maíz GMF con prácticas agrícolas convencionales, adopción de labranza en camellones, sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol, sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde, incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético, conversión a riego por aspersión, conversión a riego por goteo, y aplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego.....	144
Figura V.6. Emisiones totales de GEI por hectárea y contribución de las diferentes fuentes de emisiones estimadas para el sistema de producción GMF con prácticas agrícolas convencionales, adopción de labranza en camellones, sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol, sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde, incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético, conversión a riego por aspersión, conversión a riego por goteo, y aplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego.....	145
Figura V.7. Uso total de energía por hectárea y contribución de los diferentes insumos energéticos estimados para el sistema de producción de maíz BMF con prácticas agrícolas convencionales, adopción de labranza cero, sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol, sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde, incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético, y aplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego.....	147
Figura V.8. Emisiones totales de GEI por hectárea y contribución de las diferentes fuentes de emisiones estimadas para el sistema de producción BMF con prácticas agrícolas convencionales, adopción de labranza cero, sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol, sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde, incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético, y aplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego.....	147
Figura VI.1. Principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.....	171

Figura VI.2. Diagrama del proceso simplificado genérico de producción de harina de maíz nixtamalizado utilizado en el presente estudio.....	173
Figura VI.3. Diagrama tipo <i>Sankey</i> de los flujos estimados de materia en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.....	180
Figura VI.4. Diagrama tipo <i>Sankey</i> de los flujos estimados de agua, maíz, y cal en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.....	181
Figura VI.5. Distribución del consumo total estimado de agua entre las principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.....	181
Figura VI.6. Diagrama tipo <i>Sankey</i> de los flujos estimados de energía en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.....	182
Figura VI.7. Participación relativa de los insumos energéticos en el uso total de energía estimado en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.....	182
Figura VI.8. Participación relativa de los insumos energéticos en el uso total de energía estimado en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado, contabilizando el uso de energía <i>aguas arriba</i> en el procesamiento del gas natural y la generación de electricidad.....	182
Figura VI.9. Distribución del uso total estimado de energía entre las principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.....	183
Figura VI.10. Distribución del uso total estimado de energía entre las principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado, contabilizando el uso de energía <i>aguas arriba</i> en el procesamiento del gas natural y la generación de electricidad.....	183
Figura VI.11. Distribución de las emisiones totales estimadas de gases de efecto invernadero entre las principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.....	183

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

CAPÍTULO I

Introducción y objetivo

El crecimiento económico, el aumento de la población y los cambios en sus hábitos de alimentación ejercen una presión constante sobre los sistemas alimentarios para intensificar la producción, el procesamiento, y la distribución de alimentos. En general, la respuesta a estos desafíos ha consistido fundamentalmente en la inyección de cantidades crecientes de insumos externos en todos los segmentos de los sistemas alimentarios. Por ejemplo, entre 1960 - 1970 en el marco de la llamada *Revolución Verde*, los sistemas agrícolas experimentaron importantes transformaciones encaminadas a elevar los niveles de productividad a través del uso de semillas mejoradas, la aplicación de fertilizantes sintéticos y agroquímicos, y la mecanización de las labores agrícolas (Phillips, 2014). De esta manera, el funcionamiento de los sistemas alimentarios modernos depende en alto grado del suministro, tanto directo como indirecto, de insumos externos, entre los que destacan la energía y el agua.

El análisis simultáneo de los patrones de consumo de diferentes recursos naturales ofrece una comprensión más completa y sistémica de la que proporcionan análisis individuales para cada recurso. En este contexto se inscribe el estudio del nexo entre la energía, el agua y los alimentos, tres elementos esenciales para la subsistencia y el bienestar de las poblaciones humanas. El nexo energía-agua-alimentos puede abordarse desde diferentes perspectivas, una de ellas es la demanda de energía y agua por parte de los sistemas alimentarios. Los sistemas alimentarios articulan la producción agropecuaria, las operaciones post-cosecha, el almacenamiento, el procesamiento, el transporte y la distribución, la comercialización, y la preparación de alimentos con el propósito de producir y suministrar alimentos a la población de forma oportuna, en cantidad suficiente, y con calidad adecuada (FAO, 2011).

El uso total de energía en la cadena de valor de los sistemas alimentarios modernos es de magnitud considerable (FAO, 2011). Además, la fuente principal de dicha energía son recursos fósiles no renovables (Woods et al., 2010), cuyo uso está acompañado de múltiples impactos ambientales incluida la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) responsables de la agudización del calentamiento global y cambio climático (FAO, 2011). La alta productividad de los sistemas agrícolas convencionales depende del suministro de grandes cantidades de energía para la realización de operaciones agrícolas mecanizadas y la fabricación de fertilizantes sintéticos, pesticidas químicos, y semillas mejoradas (Gomiero, Paoletti, y Pimentel, 2008). Asimismo, los requerimientos de energía de la industria del procesamiento de los alimentos, mayoritariamente combustibles fósiles y electricidad también de origen fósil, típicamente figuran entre los más altos del sector industrial (Drescher et al., 1997). El transporte, necesario para pasar de un segmento a otro del sistema alimentario, absorbe una fracción importante del consumo final de energía global (IEA, 2014), al tiempo que la expansión de la actividad comercial en todo el mundo ha ampliado las distancias entre los puntos de producción y consumo de alimentos (FAO, 2011).

Por lo que toca al agua, la producción agropecuaria es la actividad humana más demandante de este recurso (WEF, 2011), debido en gran medida al uso extendido de riego agrícola, en tanto que la industria del procesamiento de alimentos registra una de las demandas de agua más altas en el

sector industrial (Kirby et al., 2003; López-Zavala y Flores-Arriaga, 2010; Wallis et al., 2008). El uso de agua en los sistemas alimentarios también afecta la calidad de los recursos hídricos debido, entre otros factores, a la contaminación por la aplicación desmedida de agroquímicos y las descargas de aguas residuales de la industria procesadora de alimentos (Lee y Okos, 2011; Pérez-Espejo, 2012). Obsérvese que, a diferencia de la energía, no existen alternativas de sustitución para el agua, por lo que su gestión adecuada es crucial para la viabilidad a largo plazo de los sistemas alimentarios.

La competencia por el uso de los recursos energéticos e hídricos se intensifica constantemente de la misma manera que los impactos ambientales resultado de su utilización deficiente y desmedida se agudizan exponencialmente. Tanto la energía como el agua son indispensables para la producción, el procesamiento y la distribución de alimentos. El uso óptimo de la energía y el agua en los sistemas alimentarios es crucial para asegurar la disponibilidad a largo plazo de alimentos suficientes para la población. El incremento en la eficiencia de uso de dichos insumos también es vital para mejorar el desempeño ambiental y económico de las unidades productivas, fortaleciendo con ello la sustentabilidad de los sistemas alimentarios en su conjunto. Para cumplir con ese objetivo es indispensable conocer con el mayor nivel de detalle posible los patrones de uso de energía y agua a lo largo de la cadena de valor de los sistemas alimentarios.

Cada actividad o segmento de los sistemas alimentarios tiene requerimientos específicos de energía y agua, y los impactos ambientales asociados a su consumo también son distintos. De igual forma, los sistemas alimentarios son diversos y producen una amplia variedad de alimentos de consumo final, por lo que las demandas de energía y agua y la generación de las respectivas cargas ambientales dependen en mucho del tipo producto y su tecnología de producción. De ahí la pertinencia de realizar análisis específicos para cada producto alimentario. En esta lógica, la prioridad la tienen, por obvias razones, los alimentos básicos de cada país o región. En el caso de México, el maíz (*Zea mays*, L.) es uno de los cultivos esenciales en la dieta de la población ya que con él se preparan multitud de alimentos de consumo popular que cubren una buena parte de las necesidades calóricas y proteínicas, sobre todo de los estratos de menores ingresos económicos (McDonough, Gomez, Rooney, y Serna-Saldivar, 2001).

La cadena de valor del maíz en México conforma un complejo sistema agroindustrial el cual integra los sectores de producción primaria y de transformación industrial con el propósito de elaborar y comercializar productos intermedios y de consumo final (FAO, 1997). El maíz grano se cultiva en todo el territorio nacional, principalmente bajo condiciones de temporal (SIACON, 2014), y el valor comercial de la cosecha de maíz representa una porción importante del PIB agropecuario (De León y Rodríguez, 2010). Dos variedades de maíz concentran la mayor proporción de la superficie y el volumen de producción, a saber, el maíz blanco y, en menor medida, el maíz amarillo. El primero se destina predominantemente al consumo humano directo, mientras que el segundo se canaliza casi en su totalidad a los sectores pecuario e industrial (FIRA, 2014; SIAP, 2015). La tortilla de maíz es el alimento más popular y, por tanto, el de mayor consumo en el país (Cruz y Verdalet, 2007; SE, 2012). El procesamiento primario del maíz para la elaboración comercial de tortilla lo llevan a cabo las industrias de la masa de nixtamal y de la harina de maíz nixtamalizado (Torres-Torres, 1994). Alrededor de dos tercios de la oferta total de maíz blanco para consumo humano es procesada por estas industrias (FIRA, 2014). Un rasgo distintivo de la agroindustrial del maíz en México es la coexistencia de la tradición y la modernidad en cada uno de sus sectores principales. Esta particularidad afecta directamente su eficiencia en el uso de recursos naturales y su desempeño en términos ambientales.

A la fecha se carece de estudios que examinen de manera conjunta los patrones de uso de energía y agua, así como estrategias posibles para reducir la demanda de dichos recursos y la magnitud de las cargas ambientales producto de su utilización en los segmentos principales de la agroindustria del maíz en México. De ahí que, los objetivos del presente trabajo son:

Objetivo general

- Estimar el consumo de agua, el uso de energía, y las emisiones de gases de efecto invernadero en los principales sectores de la agroindustria del maíz en México, así como identificar, y de ser posible cuantificar, los potenciales de reducción de consumo de agua, uso de energía, y emisiones de gases de efecto invernadero en los sectores investigados.

Objetivos específicos

- Realizar una estimación preliminar del uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero de los segmentos principales de la agroindustria del maíz grano en México a partir de información existente en fuentes bibliográficas.
- Calcular la demanda de agua de riego, el uso de energía para riego y las emisiones asociadas de gases de efecto invernadero en los sistemas de producción de maíz grano con riego más importantes en México.
- Estimar el uso de energía, el consumo de exergía, y las emisiones de gases de efecto invernadero de sistemas representativos de producción de maíz grano en México con el propósito de obtener una batería de indicadores para comparar su eficiencia en términos de uso de recursos naturales y e impacto ambiental.
- Evaluar los potenciales de reducción en la demanda de agua de riego, uso de energía, y emisiones de gases de efecto invernadero de los principales sistemas intensivos convencionales de producción de maíz grano en México producto de la introducción de prácticas agrícolas alternativas.
- Estimar el consumo de agua, el uso de energía, y las emisiones de gases de efecto invernadero de origen energético, así como también discutir posibles alternativas para disminuir la demanda de agua y energía y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, en la producción industrial de harina de maíz nixtamalizado.

Nótese que los capítulos de la presente tesis están organizados como una colección de artículos, cada uno dedicado a los objetivos específicos arriba mencionados. Así, cada capítulo se compone de un resumen breve, una introducción, la descripción de la metodología y las fuentes de información consultadas, la presentación y discusión de los resultados, las conclusiones principales y el listado de las referencias bibliográficas. Adicionalmente, al final del documento se desarrollan las conclusiones generales de la investigación.

Referencias

- Cruz, H.E. y Verdalet, G.I., 2007. Tortillas de maíz: Una tradición muy nutritiva, La ciencia y el hombre, vol. XX, no. 3, septiembre-diciembre 2007. Disponible en: <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol20num3/articulos/tradicion/> [Consultado el: 03/03/2014].
- De León, C. y Rodríguez, M.R., 2010. El cultivo del maíz. Temas selectos Vol. II., Madrid: Mundi-Prensa.

- Drescher, S. et al., 1997. A review of energy use in the food industry, en: 1997 Summer Study on Energy Efficiency in Industry. Washington DC: American Council for an Energy-Efficient Economy, pp. 29–40. Disponible en: <http://aceee.org/files/proceedings/1997/data/> [Consultado el: 06/08/2015].
- FAO, 1997. La agroindustria y el desarrollo económico, en: El estado mundial de la agricultura y la alimentación 1997. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations, pp. 221–268. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/w5800s/w5800s12.htm#E12E3> [Consultado el: 19/10/2014].
- FAO, 2011. Energy-smart food for people and climate, Roma, Italia: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FIRA, 2014. Análisis sectorial de la red maíz, México, D.F. Dirección de Investigación Económica y Sectorial. Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura. Disponible en: <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/TemasUsuario.jsp>. [Consultado el: 15/12/2015].
- Gomiero, T., Paoletti, M. G., y Pimentel, D., 2008. Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27(4), 239–254.
- IEA, 2014. Key World Energy Statistics, International Energy Agency, Paris, France.
- Kirby, R.M., Bartram, J. y Carr, R., 2003. Water in food production and processing: quantity and quality concerns. *Food Control*, 14, pp.283–299.
- Lee, W. y Okos, M.R., 2011. Sustainable food processing systems - Path to a zero discharge: reduction of water, waste and energy. *Procedia Food Science*, 1, pp.1768–1777.
- López-Zavala, M. y Flores-Arriaga, B., 2010, Industria, en Jiménez Blanca, Ma. Luisa Torregrosa, Luis Aboites (eds.), El agua en México: Cauces y encauses, México, AMC-CONAGUA, pp. 179-203.
- McDonough, C.M., Gomez, M.H., Rooney, L.W., Serna-Saldivar, S.O., 2001. Alkaline-cooked corn products, en: Lusas, E.W., Rooney, L.W. (Eds.), *Snack Foods Processing*. Technomic Publishing Co., PA, USA, pp. 73–113.
- Pérez-Espejo, R.H., 2012. La contaminación agrícola del agua: Aspectos generales y teoría. In R. H. Pérez Espejo & A. Aguilar Ibarra, eds. *Agricultura y contaminación del agua*. México, D.F.: Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, pp. 23–44.
- Phillips, R.L., 2014. Green Revolution: Past, present, and future. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, pp.529–538.
- SE, 2012. Análisis de la cadena de valor maíz-tortilla: Situación actual y factores de competencia local, Secretaría de Economía, México, D.F. Disponible en: http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/2_0120411_analisis_cadena_valor_maiz-tortilla.pdf. [Consultado el: 15/08/2015].
- SIACON, 2014. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, México, D.F. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/optestadisticasiacon2012parcialsiacon-zip/> [Consultado el: 23/02/2016].
- SIAP, 2015. Disponibilidad - consumo de maíz blanco y amarillo, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, México, D.F. Disponible en: http://www.numerosdelcampo.sagarpa.gob.mx/publicnew/maiz_amarillo.php [Consultado el: 06/09/2015].
- Torres-Torres, F., 1994. La agroindustria del maíz en México. El espacio y el dilema entre tradición y modernismo; el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Problemas del Desarrollo*, (Julio-Septiembre), pp.203–233.
- Wallis, D., Brook, P. y Thompson, C., 2008. Water sustainability in the Australian food processing industry. In *Australian Food Statistics 2007*. Canberra: Food and Agriculture dicision. Australian Government Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, pp. 27–34.
- WEF, 2011. Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus : The World Economic Forum Initiative D. Waughray, ed., Washington DC: Island Press. Disponible en: <http://islandpress.org/water-security> [Consultado el: 14/11/2015].
- Woods, J. et al., 2010. Energy and the food system. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B*, 365(1554), pp.2991–3006.

CAPÍTULO II

Estimación del uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero de la agroindustria del maíz blanco en México¹

Resumen

Los cambios sociales y económicos en las sociedades modernas han favorecido la integración de los sectores de producción primaria y de procesamiento industrial, resultando en la conformación de sistemas agroindustriales complejos. En México, el maíz es el cereal más importante en el consumo nacional de manera que la agroindustria del maíz juega un papel relevante en términos sociales y económicos. El maíz blanco es la variedad dominante de maíz cultivada en México, principalmente para consumo humano directo. La agroindustria del maíz blanco demanda diferentes tipos y cantidades de energía para producir, transportar, almacenar, preservar, y procesar el grano en múltiples productos derivados. El propósito de este trabajo es estimar el uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los segmentos clave de la agroindustria del maíz blanco en México a partir de información disponible en fuentes bibliográficas. Los segmentos examinados incluyeron la producción nacional de maíz grano blanco, el transporte del grano, el almacenamiento y conservación del grano, el procesamiento del maíz grano y la elaboración de tortilla de maíz. El uso total de energía en la agroindustria del maíz blanco se estimó en 123.3 – 217.3 PJ. La producción nacional de maíz grano blanco (58.5 – 62.8 PJ) y la producción mecanizada de tortilla (31.4 – 92.9 PJ) se identificaron como los segmentos más intensivos en energía. Los insumos derivados de recursos fósiles como diésel, fertilizantes sintéticos, gas LP, y electricidad son las fuentes de energía principales usadas en esta agroindustria. Sin embargo, las formas de energía no comercial (e.g. trabajo humano y animal) hacen una contribución importante a los requerimientos totales de energía, especialmente en la producción nacional de maíz. Las emisiones totales de GEI se estimaron en 9.0 – 16.5 Tg-CO₂eq, de las cuales la producción mecanizada de tortilla (2.3 – 6.9 Tg-CO₂eq) y la producción nacional de maíz blanco (3.7 – 4.5 Tg-CO₂eq) aportan la mayor proporción. En general, la información pública disponible sobre el uso de energía en los segmentos seleccionados de la agroindustria del maíz blanco en México es escasa, desactualizada, y muestra valores sumamente dispersos. Se requieren estudios adicionales para obtener estimaciones más exactas. En particular, la producción nacional de maíz, el transporte de maíz, y el procesamiento industrial deben examinarse con mayor detalle.

II.1 Introducción

Los cambios sociales y económicos en las sociedades modernas han favorecido la integración de los sectores de producción primaria y de procesamiento industrial, resultando en la conformación de sistemas agroindustriales complejos. En general, un sistema agroindustrial articula la producción de insumos industriales, la producción agropecuaria, el acondicionamiento, preservación y procesamiento industrial de los productos primarios, las actividades de transporte y distribución, así como el consumo final de los productos procesados (Torres, 1997; Villarespe, 1985).

¹ Basado en el trabajo: Juárez-Hernández, S., Sheinbaum, C., 2016. *Energy use and CO₂ emissions of the Mexican white maize agroindustry. Proceedings of ECOS 2016 – The 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. June 19 – 23, 2016. Portoroz, Slovenia.*

Los sistemas agroindustriales normalmente se constituyen en torno a productos primarios estratégicos. En el caso de México, el maíz es el más cereal más importante en el consumo nacional de modo que la agroindustria del maíz tiene un papel relevante desde las perspectivas social y económica. En el periodo 2010-2014, la superficie sembrada promedio anual con maíz fue cercana a 7.6 millones de hectáreas (ha), esto es, aproximadamente un tercio de la superficie agrícola nacional, mientras que el volumen de producción ascendió a 21.8 millones de toneladas (rendimiento promedio de 3.2 ton ha^{-1}), representando alrededor de 20% del valor económico del total de la producción agrícola nacional (SIAP, 2015a). Según el Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 (INEGI, 2009), en el país existen cerca de 2.8 millones de unidades de producción de maíz con un tamaño promedio de 3.0 ha por unidad de producción.

El maíz se cultiva en condiciones agro-climáticas y escalas de producción diversas, combinando una variedad de prácticas agrícolas. Sin embargo, es posible distinguir dos sistemas básicos de producción de maíz, la producción tradicional y la producción comercial (Mejia y Peel, 2009; Montañez y Warman, 1982; Toledo et al., 1989). Típicamente, la producción tradicional de maíz se realiza en parcelas pequeñas de temporal utilizando métodos tradicionales intensivos en mano de obra y pocos insumos agrícolas, al tiempo que el maíz cosechado se destina principalmente al autoconsumo. En tanto, los grandes productores comerciales poseen extensas áreas de buen temporal y bajo riego, con un uso intensivo de maquinaria, fertilizantes sintéticos, agroquímicos, y semillas mejoradas. Entre estos dos extremos existe un grupo numeroso de productores en transición que combinan prácticas de los sectores tradicional y comercial (CIA, 1980).

Si bien en México se cultivan un gran número de variedades de maíz, la variedad más importante es el maíz blanco. Éste representa alrededor de 94% (7.1 millones de ha) de la superficie sembrada total y 90% (19.6 millones de toneladas) de la producción total anuales promedio de maíz grano, respectivamente, en el periodo 2010-2014 (SIAP, 2015a). El total de la producción nacional de maíz blanco es para consumo interno, en tanto que las importaciones representan una fracción marginal (aproximadamente 3%) de la oferta total de maíz blanco. La relevancia del maíz blanco deriva de su uso para la preparación de varios alimentos de consumo popular en México. Según una fuente oficial (SIAP, 2015b), más de la mitad de la producción nacional de maíz blanco la absorbe el consumo humano directo comercial.

El maíz blanco para consumo humano directo generalmente se somete a un tratamiento denominado nixtamalización. Este tratamiento consiste en la cocción y remojo de los granos de maíz en una solución acuosa de cal (i.e. hidróxido de calcio, Ca(OH)_2) para obtener el nixtamal (i.e. granos de maíz cocidos), el cual después se lava con agua limpia y muele para producir una pasta húmeda, llamada masa de nixtamal, a partir de la cual se preparan múltiples alimentos y bebidas tradicionales (Bressani, 2008; Ranum et al., 2014). La nixtamalización provoca una serie de cambios químicos y estructurales en el grano de maíz que en conjunto mejoran su valor nutricional (Bressani, 2008).

La mayoría del maíz blanco para consumo humano se utiliza para la preparación de tortilla de maíz, producto alimentario de forma plana y circular elaborado hecho de masa cocida de maíz nixtamalizado que complementa las comidas cotidianas de la población mexicana. En el periodo 2004-2006, se estima que anualmente alrededor de 10.1 millones de toneladas de maíz blanco se destinaron a la elaboración de tortilla de maíz (Polanco y Flores, 2008). Además, se calcula que la cadena de valor de la tortilla de maíz representa casi 1% del producto interno bruto de México (Polanco y Flores, 2008).

El procesamiento del maíz blanco para la producción comercial de tortilla lo realizan dos industrias, la industria tradicional de la masa de nixtamal y la industria de la harina de maíz nixtamalizado. La industria tradicional de la masa de nixtamal la integran predominantemente molinos pequeños de propiedad familiar conocidos como molinos de nixtamal, donde se procesa el maíz siguiendo el método tradicional de nixtamalización (Torres, 1994). En todo el país, se calcula que existen alrededor de 92,000 establecimientos dedicados a la molienda de nixtamal y la elaboración de tortilla de maíz (INEGI, 2015). Por otra parte, la industria de la harina de maíz nixtamalizado es una industria relativamente moderna, concentrada en dos grandes compañías privadas que en conjunto operan 25 plantas con una capacidad de procesamiento total de 3.6 millones de toneladas de harina de maíz (GRUMA, 2015; MINSA, 2015). Actualmente, cerca de 56-66% de la producción total de tortilla de maíz se elabora a partir de masa de nixtamal (GRUMA, 2015; MINSA, 2015). La tortilla de maíz se elabora de diferentes maneras. Por ejemplo, en las comunidades rurales normalmente la tortilla se prepara de forma casera y manual para consumo propio de las familias campesinas mientras que en las zonas urbanas, predomina la producción comercial mecanizada. Se estima que en el país operan entre 63,000 – 84,000 máquinas tortilladoras, que utilizan mayoritariamente masa de nixtamal como materia prima (Hernández, 2011).

Una característica distintiva de la agroindustria del maíz blanco en México es la combinación de prácticas tradicionales y modernas en todos sus segmentos, desde el cultivo del maíz hasta su procesamiento industrial. Esta condición influye en sus requerimientos energéticos e impactos ambientales, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). De ahí que el análisis de las demandas energéticas a lo largo de la cadena de valor de la agroindustria del maíz blanco puede proporcionar información útil para optimizar el uso de energía y así contribuir a fortalecer la sustentabilidad a largo plazo de esta agroindustria estratégica. El propósito de este trabajo es estimar el uso de energía y las emisiones de GEI asociadas de los segmentos clave de la agroindustria del maíz blanco en México a partir de información disponible en fuentes bibliográficas. De esta manera se estará en condiciones de definir un perfil energético preliminar de este importante sistema agroindustrial.

II.2 Metodología y fuentes de información

Se examinaron los siguientes segmentos de la agroindustria del maíz blanco: (i) producción nacional de maíz grano, (ii) transporte de maíz grano, (iii) almacenamiento y conservación del maíz grano, y (iv) procesamiento del maíz grano (**Figura II.1**). Las estimaciones del uso de energía y las emisiones de GEI (en CO₂eq) incluyeron la energía y las emisiones indirectas asociadas a la producción de los insumos materiales y energéticos principales en cada uno de los segmentos mencionados.

En relación a la producción nacional de maíz blanco, la información sobre superficie sembrada, volumen de producción y consumo interno se obtuvo de fuentes gubernamentales (SIAP, 2015a, 2015b). El uso de energía en la producción nacional de maíz blanco se estimó a partir de datos reportados para los sistemas típicos de producción de maíz en México (Masera, 1990; Masera et al., 1987; Orozco, 2007; Pimentel y Pimentel, 2008) (**Tabla II.1**). Obsérvese que estos datos provienen de un número limitado de localidades, por lo que podrían no ser representativos de toda la diversidad de sistemas de producción de maíz. Sin embargo, a la fecha la información disponible sobre el uso de energía en el cultivo de maíz específicamente en México es escasa. El uso de energía en el transporte del maíz cosechado se excluyó del cálculo del uso de energía en la producción de

maíz grano, pues aquél se estimó por separado. En caso de no ser reportadas, la energía y las emisiones GEI asociadas a la fabricación de los insumos agrícolas se determinaron en base a datos tomados de la bibliografía (Graboski, 2002; S. Kim et al., 2014; Orozco, 2007; Pimentel y Pimentel, 2008).

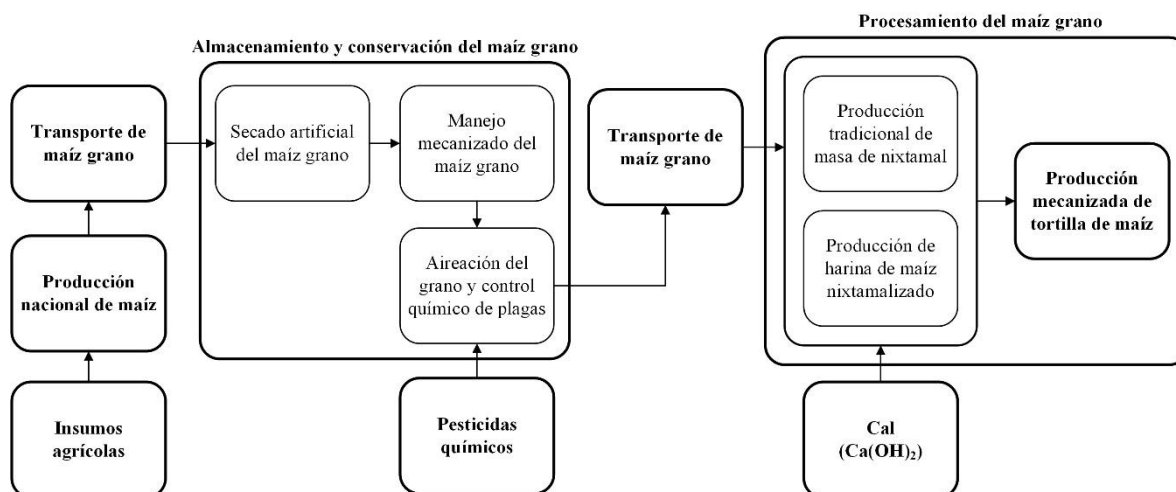


Figura II.1. Sistema agroindustrial del maíz blanco en México

Nótese que las fuentes consultadas clasifican a los sistemas de producción de maíz según la fuente de tracción utilizada en las operaciones agrícolas (i.e. trabajo humano, animales de tiro, maquinaria, y tracción mixta). Por tanto, la proporción de la superficie sembrada de maíz blanco correspondiente a cada fuente de tracción se estimó a partir de información publicada en la literatura relevante (Cruz et al., 2004; Vega y Ramírez, 2008). Las emisiones GEI de la producción de maíz blanco incluyeron las emisiones directas de N_2O asociadas a la aplicación de fertilizantes nitrogenados. Se utilizó un factor de emisión por defecto igual a $0.01 \text{ kg N}_2\text{O-N kg}^{-1} \text{ N aplicado}$ (IPCC, 2006). El contenido de nitrógeno en el estiércol utilizado como fertilizante orgánico se tomó de valores típicos reportados (Trinidad, 2014) y la conversión a CO_2eq se hizo con los potenciales de calentamiento global a 100 años de cada GEI (IPCC, 2007).

En relación al transporte de maíz grano, se consideraron las cantidades de maíz trasladadas de los campos de cultivo a los almacenes comerciales ($MB_{\text{campo-almacén}}$) y de éstos a los grandes compradores del grano ($MB_{\text{almacén-comprador}}$). Las estimaciones se basaron en la estructura modal y las distancias de traslado ponderadas en el transporte interno de maíz grano reportadas en informes gubernamentales (SAGARPA, 2011) (Tabla II.2). Se emplearon valores típicos de las intensidades energéticas ($\text{MJ ton}^{-1} \text{ km}^{-1}$) de las diferentes modalidades de transporte de carga (NRC, 2014). El valor de $MB_{\text{campo-almacén}}$ se estimó como la diferencia entre la producción nacional de maíz blanco y la cantidad destinada a autoconsumo y uso como semilla. El valor de $MB_{\text{almacén-comprador}}$ se estimó como la suma de $MB_{\text{campo-almacén}}$, el inventario inicial y las importaciones menos las mermas y el inventario final.

Tabla II.1. Insumos energéticos por hectárea sembrada en algunos de los sistemas de producción de maíz grano en México según distintas fuentes.

Fuente de tracción	Producción a pequeña y mediana escala					Producción comercial a gran escala	
	Trabajo humano	Animales de tiro	Mecánica	Mixta	Mecánica		
Referencia	(Pimentel y Pimentel, 2008)	(Masera, 1990; Masera et al., 1987)	(Pimentel y Pimentel, 2008)	(Masera, 1990; Masera et al., 1987)	(Masera, 1990; Masera et al., 1987)	(Orozco, 2007)	(Orozco, 2007)
Insumo [MJ ha ⁻¹]							
Trabajo humano	2,465.1	230.5	825.3	178.9	241.1	259.0	96.1
Trabajo animal		1,087.4	2,071.1		442.7	718.0	71.4
Semillas	153.2	220.9 ^d	153.2	294.6 ^d	294.6 ^d	300.0	3,177.9
Maquinaria	69.3 ^c		173.2 ^f			1,815.0	3,407.4 ^m
Diésel				1,109.6 ^g	577.0	638.0	2,216.8 ^m
N fertilizante		4,977.1 ^e		1,640.3 ^h	2,161.5 ^j	1,037.8 ^k	12,804.8 ⁿ
P fertilizante		266.3 ^e		221.9 ^h	44.4 ^j	256.2 ^k	1,344.5 ⁿ
K fertilizante							336.1 ⁿ
Estiércol						245.0	
Herbicidas						12.0	221.7
Insecticidas							714.4
Electricidad							221.7
Transporte maíz ^a				169.9 ⁱ	169.9 ⁱ	41.0 ^l	
Transporte insumos ^b				577.0	88.8		22.2
Total	2,687.5	6,782.3	3,222.8	4,192.2	4,020.0	5,322.0	24,635.0
Rendimiento de maíz [kg ha ⁻¹]	1,944.0	1,145.0	941.0	1,060.0	1,260.0	882.0	7,509.0
Intensidad energética [MJ kg ⁻¹ de grano]	1.4	5.9	3.4	4.0	3.2	6.0	3.3

^a Transporte del maíz cosechado. ^b Transporte de insumos agrícolas, trabajadores, etc. ^c Fabricación de hacha y azadón. ^d Considerando 14.73 MJ kg⁻¹ de semilla (Pimentel y Pimentel, 2008). ^e Según la fuente, 30 kg de fertilizante se aplican en la siembra y 200 kg en el deshierbe. Sin embargo, el tipo de fertilizante aplicado no se especifica. Entonces, se consideró que en la siembra se aplica fosfato diamónico y en el deshierbe se aplica urea, en concordancia con (Orozco, 2007). Los equivalentes energéticos se tomaron de (Orozco, 2007). ^f Fabricación de implementos para animales de tiro. ^g Incluye la energía usada en la extracción, refinación y transporte del diésel, según (Graboski, 2002). ^h Según la fuente, 25 kg de fertilizante se aplican en la siembra y 60 kg en el deshierbe. Véase la nota ^e. ⁱ Camioneta de pequeña capacidad que funciona con gasolina. ^j Según la fuente, 5 kg de fertilizante se aplican en la siembra y 90 kg en el deshierbe. Véase nota ^e. ^k Según la fuente, 674.0 MJ ha⁻¹ de fertilizantes se aplican en la siembra y 620.0 MJ ha⁻¹ en la segunda fertilización. Se asumió que los fertilizantes aplicados son fosfato diamónico y urea, respectivamente. Los equivalentes energéticos se tomaron de (Orozco, 2007). ^l Diésel para transporte de maíz cosechado y de insumos agrícolas. ^m Valores estimados. ⁿ Valores estimados a partir de las dosis recomendadas de fertilizantes para la producción de maíz según (Gavi, 2014) y los equivalentes energéticos tomados de (Orozco, 2007).

Tabla II.2. Estructura modal y distancia de transporte promedio ponderada estimadas para el transporte interno de maíz grano blanco (SAGARPA, 2011).

Interno de maíz grano blanco (SAGARFA, 2011).							
	Porcentaje del maíz transportado [%]	Estructura modal [%]					Distancia de transporte promedio ponderada [km]
		Autotransporte (ligero)	Autotransporte (mediano)	Autotransporte (pesado)	Ferrocarril	Marítimo	
<i>Proveedores de maíz</i>							
		<i>De los campos de maíz a los almacenes comerciales</i>					
Productores individuales	71.3	49.4	43.7	6.9			19.2
Grupos de productores	8.4	22.4	50.0	26.3	1.3		69.2
Compañías nacionales	12.6	7.1	42.9	46.9		3.1	448.2
Compañías internacionales	1.5	16.7	33.3	33.3		16.7	131.6
Socios del almacén	6.2	56.5	41.3	2.2			24.7
Total	100.0						
<i>Compradores de maíz</i>							
		<i>De los almacenes comerciales a los compradores de maíz</i>					
Productores individuales	33.7	31.3	42.5	23.5	2.6		95.5
Grupos de productores	7.4	12.5	45.8	39.6	2.1		82.2
Compañías nacionales	49.1	3.4	29.8	59.2	7.6		190.7
Compañías internacionales	3.2	5.0	25.0	45.0	25.0		332.3
Exportaciones	3.2	14.3	9.5	76.2			251.0
Socios del almacén	3.5	92.3	7.7				12.1
Total	100.0						

En el segmento de almacenamiento y conservación del maíz grano, las operaciones consideradas fueron secado artificial, manejo mecánico, aireación, y fabricación de pesticidas para el control de plagas en el grano almacenado. El uso de energía promedio para el secado convencional del grano a alta temperatura se obtuvo de la bibliografía (Shouse et al., 2012). De igual forma, el uso de energía y las emisiones GEI asociados a la generación nacional de electricidad fueron aproximados a partir de información secundaria (Delucchi, 1996; Ghanta et al., 2014; Graboski, 2002; Kim et al., 2014; SENER, 2014; Stanek y Bialecki, 2014). Se asumió que sólo el maíz grano proveniente de la producción comercial a gran escala se somete a secado artificial puesto que el maíz de la producción tradicional normalmente se seca mediante radiación solar y circulación natural de aire en el mismo campo de cultivo o en graneros pequeños (CIA, 1980; Moreno, 1995).

El volumen de maíz procedente de la producción comercial a gran escala se aproximó a partir de la tipología de productores de maíz en México (Vega y Ramírez, 2008), considerando que la producción comercial a gran escala típicamente alcanza rendimientos superiores a 5.0 ton ha⁻¹. El uso de energía para el manejo mecanizado, aireación y fabricación de pesticidas para el maíz almacenado se calculó a partir de los consumos específicos reportados en estudios previos publicados (Graboski, 2002). La cantidad de maíz asociada a estas operaciones correspondió a $MB_{\text{campo-almacén}}$. Esta suposición se sustentó en el hecho de que la mayor parte del total de la capacidad de almacenamiento de maíz grano en México (alrededor de 88%) corresponde a almacenes de gran capacidad (>5,000 toneladas)

con equipos para el transporte mecánico, acondicionamiento y preservación de los granos (SAGARPA, 2011).

En el segmento del procesamiento del maíz blanco, se examinaron las siguientes actividades: (i) producción tradicional de masa de nixtamal, (ii) producción de harina de maíz nixtamalizado, y (iii) producción mecanizada de tortilla de maíz. El uso de energía y las emisiones GEI relacionados con la fabricación de cal también fueron consideradas. La cantidad de maíz grano procesada por cada una de estas industrias se determinó a partir del consumo per cápita diario de productos alimentarios derivados del maíz de las poblaciones urbana y rural en el país (López, 2014) en conjunto con las mediciones demográficas más recientes disponibles (WBG, 2015). Asimismo, se tomaron en cuenta las pérdidas promedio de procesamiento de maíz en cada una de las industrias arriba mencionadas (Serna-Saldivar y Amaya, 2008). Se recopilaron valores reportados del uso de energía en la producción tradicional de masa de nixtamal molinos de nixtamal típicos (Ambriz and Paredes, 2009; Garzón, 2012; Santin, 1985) y en la producción industrial de harina de maíz nixtamalizado (Estrada, 1956; Facio, 1991; Hernández et al., 1984).

Con respecto a la producción de tortilla de maíz, únicamente se consideró la producción comercial mecanizada. Se asumió que el total de tortilla de maíz consumida por la población rural es elaborada con masa de nixtamal. Además, se consideró que el 60% del total de tortilla consumida por la población urbana se produce con masa de nixtamal y el restante 40% con harina de maíz nixtamalizado (GRUMA, 2015; MINSA, 2015). Los requerimientos energéticos de los modelos de máquinas tortilladoras más utilizados en el país se obtuvieron de estudios previos (Hernández, 2011; Santin, 1985). Para realizar las conversiones convenientes, se emplearon los factores de transformación siguientes: 0.94 kg de harina de maíz producida por kg de maíz grano procesado, 1.75 kg de tortilla producida por kg de harina de maíz, 1.70 kg de masa de nixtamal producida por kg de maíz procesado, y 0.81 kg de tortilla producida por kg de masa de nixtamal (Cebreros, 1997).

II.3 Resultados y discusión

II.3.1 Flujos de oferta y demanda de maíz grano blanco

Según cifras de 2012, la oferta total de maíz grano blanco ascendió a aproximadamente 22.2 millones de toneladas, de las cuales poco más de 90% provino de la producción nacional en tanto que las importaciones representaron menos de 3%. Esto sugiere que el país es prácticamente auto-suficiente en maíz grano blanco (**Tabla II.3**).

En relación al consumo de maíz grano blanco, el consumo humano directo se estimó en casi 12.0 millones de toneladas. De esta cantidad, alrededor de 60% fue procesada por la industria tradicional de la masa de nixtamal y 30% por la industria de la harina de maíz nixtamalizado. Aproximadamente 8.4 millones de toneladas de maíz grano blanco, esto es casi 71% del total de maíz para consumo humano directo, se utilizaron para la elaboración de tortilla de maíz. El consumo como grano representó cerca de 13% del total para consumo humano. Nótese que esta última cifra comprende sólo el consumo de la población urbana puesto que la parte correspondiente a la población rural se incluyó en el apartado de auto-consumo, que concentró alrededor de 4.3 millones de toneladas. No obstante, el consumo per cápita como grano reportado por la fuente consultada (López, 2014) abarca maíz blanco y otras variedades de maíz, de manera que la cifra aquí calculada podría estar sobreestimada. El uso como alimento para ganado constituye cerca de 13% del consumo total

nacional de maíz blanco y las mermas alrededor de 4%. El porcentaje de mermas parece bajo en comparación con los valores calculados en otras fuentes, donde llega hasta 25% del total de la producción nacional de maíz grano (Ortiz et al., 2015). Posiblemente esta discrepancia responde a diferencias en los métodos de estimación.

Tabla II.3. Flujos estimados de oferta y demanda de maíz grano blanco en México.

	[10 ³ × ton]	[%]
Oferta total	22,207.00	100.0
<i>de la cual</i>		
Producción nacional	20,006.00	90.1
Importaciones	589.00	2.7
Inventario inicial	1,612.00	7.3
 Demanda total	 20,345.76	 100.0
<i>de la cual</i>		
Exportaciones	493.00	2.4
Consumo humano comercial	11,838.46	58.2
<i>del cual</i>		
Producción tradicional de masa de nixtamal		
Para consumo como masa de nixtamal	972.60	8.2
Para la elaboración de tortilla	5,925.56	50.1
Producción de harina de maíz nixtamalizado		
Para consumo como harina de maíz	975.50	8.2
Para la elaboración de tortilla	2,449.54	20.7
Consumo como grano	1,515.26	12.8
Auto-consumo	4,348.30	21.4
Consumo animal ^a	2,671.00	13.1
Uso como semilla	161.00	0.8
Mermas	834.00	4.1
 Inventario final	 1,861.24	

^a Industria de alimentos balanceados para animales.

II.3.2 Uso de energía en la producción nacional de maíz grano blanco

En 2012, aproximadamente 7.0 millones de hectáreas en todo el país se sembraron con maíz grano blanco para alcanzar una producción total cercana a 20.0 millones de toneladas de grano. A partir de estas cifras, se estimó que el uso de energía para la producción nacional de maíz grano blanco se encuentra en el rango de 58.5 – 62.8 PJ (**Tabla II.4**). Por kg de grano producido, el uso de energía se calculó entre 2.9 – 3.1 MJ kg⁻¹ de grano. La mayor parte de la energía utilizada se relaciona con la producción comercial a gran escala debido al uso intensivo de maquinaria agrícola, pesticidas y fertilizantes sintéticos, en particular fertilizantes nitrogenados. En conjunto, los fertilizantes sintéticos y los pesticidas concentraron cerca de 50% del uso total de energía en la producción de maíz blanco mientras que el diésel para maquinaria agrícola representó casi 12%.

No obstante, las energías humana y animal, asociadas principalmente a la producción tradicional de maíz grano, aportaron 6.3 – 6.6 PJ al total de la energía usada en la producción nacional del grano, esto es, una cantidad similar a la del diésel para maquinaria agrícola. Estos resultados sugieren que en general el nivel de mecanización de la producción de maíz blanco en México es relativamente

bajo. Obsérvese que la producción de maíz no mecanizada con uso limitado de insumos agrícolas modernos concentró cerca de 27% del total de la superficie sembrada de maíz blanco. Sorpresivamente, el uso de energía por kg de maíz cosechado cae dentro del rango del uso de energía no renovable en la producción intensiva de maíz grano en los EE.UU. ($1.44 - 3.50 \text{ MJ kg}^{-1}$ de maíz) (Kim et al., 2014). Si bien la producción de maíz en los EE.UU. es altamente intensiva en el uso de insumos agrícolas derivados de energía fósil, las condiciones agro-climáticas más favorables para el cultivo del maíz en dicho país contribuyen a obtener rendimientos altos y con ello a reducir sustantivamente el uso de energía por unidad de grano producido.

Tabla II.4. Insumos energéticos estimados para la producción nacional de maíz grano blanco.

Fuente de tracción	Unidades	Producción en pequeña y mediana escala				Producción comercial en gran escala	Total
		Trabajo humano	Animales de tiro	Mixta	Mecánica	Mecánica	
Superficie sembrada	[$10^3 \times \text{ha}$]	1,343.28	528.96	1,705.19	1,781.75	1,600.79	6,959.98
Uso total de energía	[PJ]	3.61	1.70 – 3.59	6.57 – 9.01	7.17	39.44	58.48 – 62.81
Energía humana y animal	[PJ]	3.31	0.70 – 1.53	1.17 – 1.67	0.32	0.27	6.26 – 6.60
Fertilizantes y pesticidas ^a	[PJ]	-	0.00 – 2.77	2.28 – 3.76	3.32	24.69	31.77 – 33.01
Diésel	[PJ]	-	-	1.09 – 1.14	3.01	3.58	7.68 – 7.72
Otros insumos ^b	[PJ]	0.30	0.12 – 0.17	0.50 – 4.02	0.52	10.90	12.40 – 15.86

^a Fertilizantes (N, P y K) y pesticidas (herbicidas e insecticidas) sintéticos. ^b Dependiendo del sistema de producción, puede incluir los siguientes insumos: Semillas, maquinaria agrícola, estiércol, electricidad, y transporte de insumos agrícolas.

El uso de energía asociado a otros insumos agrícolas como la producción de semillas y maquinaria agrícola ascendió a $12.4 - 15.9 \text{ PJ}$. De las fuentes consultadas, sólo algunas estiman el uso de energía para la fabricación de maquinaria agrícola con porcentajes en el rango de 14% – 17% del total de energía utilizada en la producción intensiva comercial (Orozco, 2007; Pimentel, 2003; Pimentel y Pimentel, 2008). Sin embargo, se ha sugerido que el uso de energía en la fabricación de bienes de capital es incierto pues a la fecha no existe información confiable para cuantificarlo con exactitud (Kim et al., 2014).

II.3.3 Uso de energía en el transporte de maíz grano blanco

El transporte interno de maíz grano depende principalmente del autotransporte. El transporte del maíz de los campos de cultivo a los almacenes comerciales se realiza utilizando en mayor medida camiones de pequeña y mediana capacidad con una distancia promedio de recorrido de entre 19 y 450 km. Nótese que más del 70% del maíz grano transportado procede de productores individuales dispersos en todo el territorio nacional, lo que bien podría explicar el uso dominante del autotransporte en la estructura modal del transporte del grano. El transporte del maíz de los almacenes a los compradores del grano se efectúa sobre todo empleando camiones de carga de mediana y gran capacidad, aunque una fracción importante se moviliza por vía ferroviaria. Los compradores principales de maíz grano blanco son las empresas nacionales encargadas de su procesamiento industrial las cuales demandan cantidades sustantivas del grano. Casi un tercio del maíz de los almacenes comerciales es adquirido por productores individuales posiblemente para su comercialización en pequeña escala en comunidades rurales.

El uso de energía para el traslado del maíz grano de los campos de cultivo a los almacenes se estimó en torno a 440.9 MJ ton⁻¹ de maíz mientras que el correspondiente al transporte del grano de los almacenes a los compradores mayoristas se calculó en torno a 676.3 MJ ton⁻¹ de maíz. La diferencia entre estas cifras puede explicarse en buena medida por la variación en las distancias de traslado. Considerando la cantidad de maíz transportado ($MB_{\text{campo-almacén}}$ igual a 15,497 millones de toneladas y $MB_{\text{almacén-comprador}}$ igual a 15,002 millones de toneladas), el uso total de energía para el transporte del grano se estimó en aproximadamente 17.0 PJ. Alrededor de 3.7 PJ correspondieron a camiones de carga de pequeña capacidad que utilizan gasolina y 13.3 PJ a medios de transporte de carga que emplean diésel, principalmente camiones de carga de mediana (ca. 9.6 PJ) y gran (ca. 3.7 PJ) capacidad.

Estudios previos reportan diferentes estimaciones del uso de energía en el transporte del maíz grano. Por ejemplo, para el transporte de maíz de los campos a almacenes locales en una comunidad rural del centro del país se determinó un valor aproximado de 150 MJ ton⁻¹ de grano (Masera, 1990). Para el transporte de internación de las importaciones de maíz grano se estimó un uso de energía en torno a 590 MJ ton⁻¹ de grano (Camarena y Salgado, 1994). En los sistemas de producción tradicional y comercial de maíz grano en el estado de Michoacán, México se reporta valores en el rango de 190 – 1,220 MJ ton⁻¹ de grano (Orozco, 2007). Asimismo, algunos análisis energéticos de la producción de etanol a partir de maíz grano en diferentes países calculan un uso de energía para el transporte entre 164 – 575 MJ ton⁻¹ de grano (Graboski, 2002; Pimentel, 2003; Shapouri et al., 2010, 2002; Yang y Chen, 2012). La dispersión de las estimaciones podría deberse a diferencias en las suposiciones relativas a la estructura modal, la distancia de traslado, y las intensidades energéticas de los distintos modos de transporte.

II.3.4 Uso de energía en el almacenamiento y la conservación del maíz grano blanco

Se calculó que el uso de energía en el almacenamiento y la conservación del maíz grano blanco se encuentra en el rango de 2.2 – 6.8 PJ. La mayor parte de esta energía (2.1 – 6.7 PJ) está asociada al consumo de gas LP y electricidad para el secado artificial del grano necesario para reducir el contenido de humedad de 20% - 30% a 14% - 15%. Los estudios previos consultados reportan el uso de energía para el secado artificial de manera agregada en las cifras de consumo total de combustibles por lo que es difícil determinar la fracción que corresponde específicamente al secado (Kim et al., 2014) a fin de compararla con las estimaciones aquí obtenidas. El uso de energía para el manejo mecanizado, la aireación y la producción de pesticidas para el control de plagas en el grano almacenado totalizó alrededor de 0.1 PJ. La magnitud de esta última cifra posiblemente explica por qué la mayoría de los reportes similares consultados omiten la contribución de las operaciones de almacenamiento y conservación del maíz grano.

II.3.5 Uso de energía en el procesamiento del maíz grano blanco

II.3.5.1 Producción tradicional de masa de nixtamal

Se estimó que alrededor de 6.9 millones de toneladas de maíz grano blanco son procesadas por la industria tradicional de la masa de nixtamal con pérdidas de procesamiento iguales a 0.9 millones

de toneladas de grano. La producción total de masa de nixtamal ascendió a casi 10.1 millones de toneladas, la mayor parte (ca. 86%) se utilizó para la producción comercial de tortilla de maíz.

El uso de energía reportado en molinos tradicionales de nixtamal varía en el rango de 8.6 – 18.75 L de gas LP (promedio 14.5 L) y 15 – 106 kWh de electricidad (promedio 42.1 kWh) por tonelada de masa de nixtamal producida (Ambriz y Paredes, 2009; Garzón, 2012; Santin, 1985). La amplitud de los rangos se debe al menos en parte a la diversidad de métodos de nixtamalización practicados a lo largo del país (Garzón, 2012). En algunos casos se reportan valores más elevados (hasta 126 L de gas LP por tonelada de masa de nixtamal producida) (Ambriz and Paredes, 2009) pues se contabiliza los requerimientos de máquinas tortilladoras instaladas en los propios molinos de nixtamal. En general, el uso de energía térmica representa 52-96% y el de electricidad 4-48% del uso total de energía en molinos de nixtamal típicos. Partiendo de las cifras anteriores, el uso total de energía asociado a la producción tradicional de masa de nixtamal ascendió a 3.8 – 15.3 PJ, integrado por 2.3 – 5.0 PJ de gas LP y 1.4 – 10.2 PJ de electricidad. Téngase en cuenta que la contribución de electricidad corresponde a la energía primaria considerando la eficiencia de generación del sistema eléctrico nacional (ca. 38%).

En el proceso tradicional de nixtamalización se utilizan cerca de 8 – 12 kg de cal por tonelada de grano procesado (Durán-Domínguez, 1996; Ferrer, 1996; Ramírez et al., 2009; Santin, 1985). Entonces, el consumo total de cal para la nixtamalización del maíz grano blanco procesado por la industria tradicional de la masa de nixtamal se estimó en 55,200 – 83,800 toneladas que representan 0.1 – 0.2 PJ de energía, una cantidad modesta en comparación con la energía asociada al gas LP y la electricidad.

II.3.5.2 Producción de harina de maíz nixtamalizado

Se estimó que alrededor de 3.4 millones de toneladas de maíz blanco son procesadas por la industria de la harina de maíz nixtamalizado con pérdidas de procesamiento equivalentes a 0.5 millones de toneladas de grano. La producción total de harina de maíz nixtamalizado se estimó en 2.8 millones de toneladas de las cuales poco más de 70% sería utilizada para la elaboración de tortilla de maíz.

La información disponible sobre el uso de energía en la industria de la harina de maíz nixtamalizado es escasa y desactualizada. Una fuente reporta requerimientos energéticos de 140 L de diésel y 110 kWh de electricidad por tonelada de harina de maíz producida (Estrada, 1956). Otra fuente menciona 2,446 MJ de energía térmica (posiblemente obtenida de combustóleo) y 107 kWh de electricidad (Hernández et al., 1984). De igual forma, otra fuente calcula 2,954 MJ de energía térmica y 190 kWh de electricidad (Facio, 1991). Por lo tanto, el uso de energía para producir una tonelada de harina de maíz nixtamalizado podría fluctuar entre 2,446 – 5,101 MJ de energía térmica y 110 – 190 kWh de electricidad. Además, las fuentes antes mencionadas precisan que para la nixtamalización del maíz se utilizan 8 – 16 kg de cal por tonelada de harina de maíz producida.

Entonces, el uso total de energía en la industria de la harina de maíz nixtamalizado se estimó en el intervalo de 10.5 – 22.5 PJ. El uso de energía térmica ascendió a 7.6 – 17.4 PJ y el uso de electricidad a 2.8 – 5.0 PJ. El consumo total de cal se calculó entre 22,400 – 44,800 toneladas cuya fabricación implicó un uso de energía de alrededor de 0.04 – 0.08 PJ.

En comparación con las estimaciones para la industria tradicional de la masa de nixtamal, las cifras calculadas para la industria de la harina de maíz nixtamalizado muestran menor dispersión

posiblemente debido a que el proceso de producción se encuentra más estandarizado. Sin embargo, la información recopilada podría no ser representativa del perfil energético actual de la industria de harina de maíz nixtamalizado en términos de, por ejemplo, los energéticos utilizados y su intensidad energética (i.e. uso de energía por tonelada de producto).

II.3.5.3 Producción comercial mecanizada de tortilla de maíz

Se estimó que aproximadamente 8.4 millones de toneladas de maíz blanco se utilizaron para la elaboración de 10.6 millones de toneladas de tortillas de maíz en el sector comercial. No obstante que la tortilla de maíz es el principal producto alimentario derivado de este cereal en México, se carece de estadísticas confiables y actuales sobre su volumen de producción a nivel nacional. La información más confiable que pudo encontrarse (CEDRSSA, 2014), reporta que en 2013 se utilizaron alrededor de 5.0 millones de toneladas de maíz grano para la producción de 7.4 millones de toneladas de tortillas, de las cuales 6.0 millones de toneladas correspondieron a la producción mecanizada. Sin embargo, estas estimaciones se sustentan en el nivel de consumo mínimo de productos alimentarios derivados del maíz de la poblaciones urbana y rural en México (CONEVAL, 2012), de manera que el consumo real de tortilla de maíz bien podría ser superior.

El gas LP y la electricidad son los principales insumos energéticos para la producción mecanizada comercial de tortilla de maíz. El uso de energía de los modelos de máquinas tortilladoras más populares en el país que utilizan masa de nixtamal varían en el rango de 93 – 380 L de gas LP (promedio de 238 L) y 4 – 36 kWh (promedio de 20 kWh) de electricidad por tonelada de tortilla de maíz producida (Hernández, 2011; Santin, 1985). Los valores reportados para máquinas tortilladoras que utilizan masa preparada con harina de maíz nixtamalizado fluctúan entre 142 – 210 L de gas LP (promedio de 176 L) y 28 – 35 kWh de electricidad (promedio de 31 kWh). Las diferencias en el uso de energía entre máquinas tortilladoras se deben a varios factores, incluyendo el principio de funcionamiento, la capacidad de producción, y el tipo de materia prima utilizada (Hernández, 2011) así como la metodología de estimación empleada. Los valores reportados sugieren que las máquinas tortilladoras que utilizan masa de nixtamal son más intensivas en energía que las que utilizan masa elaborada con harina de maíz nixtamalizado. Una explicación posible de esta diferencia es que del total de máquinas tortilladoras que utilizan masa de nixtamal un gran número son modelos obsoletos y otro tanto son máquinas modificadas de forma empírica, lo que incide negativamente en su eficiencia energética (Hernández, 2011).

Considerando la producción nacional de tortilla de maíz, el uso total de energía para la producción mecanizada de tortilla se calculó entre 31.4 – 92.9 PJ. Las máquinas tortilladoras que utilizan masa de nixtamal absorben entre 17.4 – 72.5 PJ y las que utilizan masa preparada con harina de maíz nixtamalizado, entre 13.9 – 20.4 PJ. En ambos casos, la energía térmica obtenida de gas LP (17.2 – 70.1 PJ y 13.0 – 19.2 PJ, respectivamente) concentra la mayor proporción del uso total estimado de energía. En un estudio similar se reporta un uso de energía de 42.7 – 64.7 PJ, del cual 98% corresponde a energía térmica derivada de gas LP (Hernández, 2011); sin embargo, esta estimación ignora el uso de energía “aguas arriba” para la producción del gas LP y la generación de electricidad y asume una producción nacional de tortilla de maíz de aproximadamente 7.1 millones de toneladas.

II.3.6 Uso total de energía en la agroindustria del maíz blanco en México

A partir de las estimaciones precedentes, se calculó que el uso de energía en la agroindustria del maíz blanco en México podría ubicarse entre 123.3 – 217.3 PJ (**Figura II.2**). La mayoría de esta energía estaría asociada a la producción nacional de maíz grano blanco y a la producción comercial mecanizada de tortilla de maíz. Si se considera la energía correspondiente al diésel, fertilizantes sintéticos y pesticidas utilizados en el cultivo del grano, el uso de energía en la producción nacional de maíz grano aquí estimado equivale a 31-32% del uso total de energía comercial en el sector agrícola en México calculado para el año 2010 (125.6 PJ) (Cruz, 2013). Este porcentaje parece razonable si se toma en cuenta que la superficie sembrada con maíz grano representa aproximadamente un tercio de la superficie agrícola total del país.

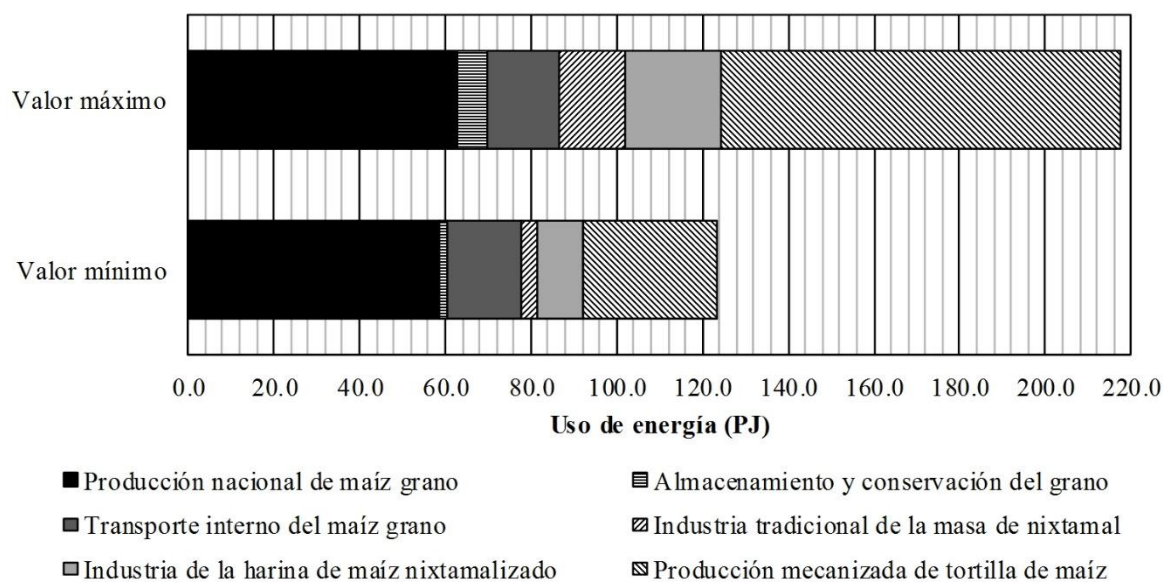


Figura II.2. Uso total de energía mínimo y máximo estimado para la agroindustria del maíz blanco en México.

Entre 8% y 14% del uso total estimado de energía correspondería al transporte interno del maíz grano. Estos valores son superiores a los reportados en algunos análisis energéticos de la producción de etanol a partir de maíz, donde el transporte del grano absorbe sólo entre 2 – 5% del uso total de energía (Graboski, 2002; Pimentel, 2003; Shapouri et al., 2010, 2002; Yang y Chen, 2012). Además, el uso total de energía estimado para el transporte del maíz grano blanco equivale a aproximadamente 3% del uso total de energía del autotransporte de carga en México en el año 2010 (671.6 PJ) (SENER-AIE, 2011). El hecho de que el transporte del maíz grano represente una fracción considerable del uso total de energía estimado para la agroindustria del maíz blanco bien podría deberse al uso predominante de camiones de carga de pequeña y mediana capacidad con altas intensidades energéticas. El uso de energía en la industria tradicional de la masa de nixtamal y en la producción mecanizada de tortilla de maíz muestra un intervalo amplio de variación. Los valores máximos estimados son casi tres veces los valores mínimos debido a la dispersión de las cifras recopiladas. Esta dispersión podría atribuirse en parte a la diversidad de equipos, condiciones de operación, y otras particularidades del proceso de producción de estos dos segmentos de la agroindustria del maíz blanco. Asimismo, diferencias temporales, geográficas, y en las metodologías de medición también podría explicar dichas discrepancias.

II.3.7 Emisiones de GEI de la agroindustria del maíz blanco en México

Las emisiones de GEI totales de la agroindustria del maíz blanco en México se estimaron en el rango de 9.0 – 16.5 Tg-CO₂eq (**Figura II.3**). La producción nacional de maíz grano y la producción mecanizada de tortilla de maíz serían responsables de la mayoría de las emisiones de GEI totales. Según las cifras obtenidas, la producción nacional de maíz blanco emitiría entre 3.7 – 4.5 Tg-CO₂eq, las cuales equivalen a cerca de 10% de las emisiones de GEI totales asociadas a la producción agrícola en México (ca. 46.7 Tg-CO₂eq) (INECC, 2012).

Las emisiones directas de N₂O por la aplicación de fertilizantes nitrogenados (1.6 – 2.0 Tg-CO₂eq) representarían alrededor de 44% de las emisiones de GEI totales del cultivo de maíz grano blanco. Este resultado es consistente con el porcentaje reportado para las emisiones directas de N₂O en el total de emisiones GEI de la producción de maíz grano en los EE.UU. (48-64%) (Kim et al., 2014). Nótese que los fertilizantes nitrogenados se utilizan principalmente en los sistemas de producción comercial intensiva de maíz blanco, los cuales son similares a los típicamente utilizados en EE.UU. y otros países industrializados.

Por kg de grano producido, las emisiones GEI de la producción nacional de maíz grano blanco serían de 0.19 – 0.23 kg-CO₂eq kg⁻¹ de grano. Otros estudios reportan 0.11 y 0.13 kg-CO₂eq kg⁻¹ de grano para los sistemas de producción tradicional e intensiva de maíz, respectivamente, aunque estas estimaciones son específicas de una localidad en el centro del país (Orozco, 2007).

Con respecto al almacenamiento y conservación del grano, el secado artificial sería por mucho la fuente principal de emisiones GEI (0.17 – 0.51 Tg-CO₂eq) debido en gran parte al uso intensivo de gas LP para la generación de energía térmica. Aproximadamente 1.6 Tg-CO₂eq serían generadas por el transporte interno del maíz grano, constituyendo 9% – 17% del total de emisiones GEI del sistema agroindustrial. Si se toma en cuenta la cantidad de grano transportada, se obtiene una generación de GEI específica cercana a 0.05 kg-CO₂eq kg⁻¹ de grano transportado. Este valor es comparable al reportado en un estudio previo (0.08 kg-CO₂eq kg⁻¹ de grano) (Orozco, 2007). Las diferencias en cuanto a la estructura modal e intensidades energéticas de los medios de transporte asumidas podrían explicar en buena medida las discrepancias entre los valores calculados.

El procesamiento del maíz grano blanco generaría entre 3.5 – 9.9 Tg-CO₂eq, en gran parte debido a la producción mecanizada de tortilla de maíz (2.3 – 6.9 Tg-CO₂eq). La combustión de gas LP para la generación de energía térmica usada en la cocción de la tortilla de maíz sería la fuente principal de emisiones GEI, contribuyendo con alrededor de 97% del total de emisiones GEI de la producción mecanizada de tortilla de maíz. Considerando el total de la producción mecanizada de tortilla de maíz, se obtiene una intensidad de emisiones de GEI de 0.22 – 0.66 kg-CO₂eq kg⁻¹ de tortilla de maíz elaborada.

Según las estimaciones, la producción de tortilla en máquinas tortilladoras que usan masa preparada con harina de maíz nixtamalizado tendrían una intensidad de emisiones GEI promedio (0.30 – 0.43 kg-CO₂eq kg⁻¹ tortilla) menor a la de las máquinas tortilladoras que utilizan masa de nixtamal (0.18 – 0.77 kg-CO₂eq kg⁻¹ de tortilla) dada la menor intensidad energética de las primeras. Un estudio previo reporta un valor de 0.9 kg-CO₂eq kg⁻¹ de tortilla para máquinas tortilladoras que usan masa de nixtamal (Orozco, 2007), el cual es cercano al límite superior estimado en el presente análisis.

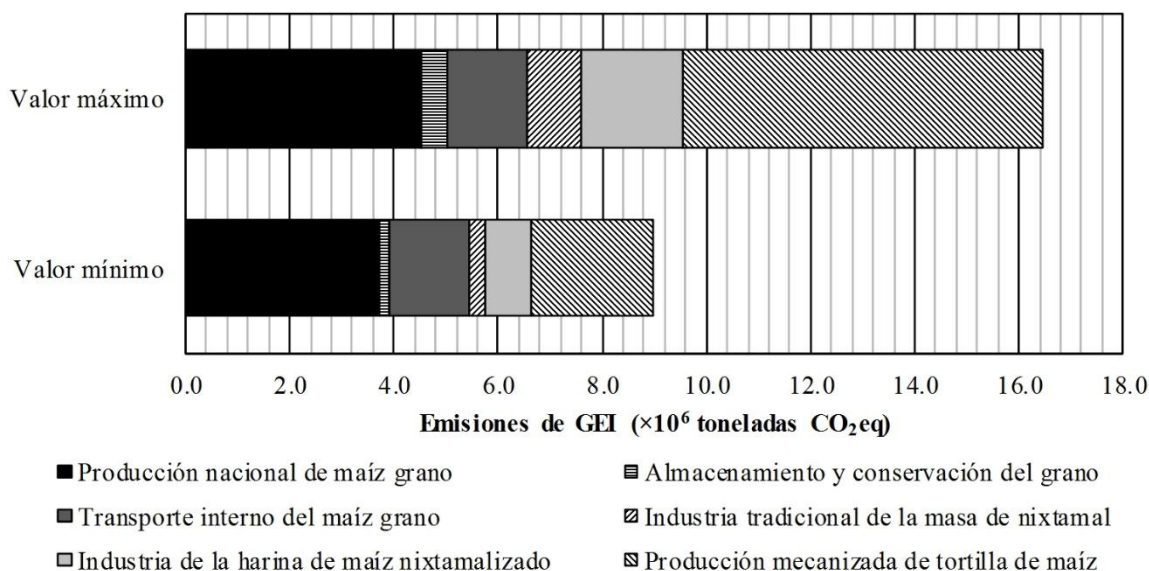


Figura II.3. Emisiones GEI totales mínimas y máximas estimadas de la agroindustria del maíz blanco en México.

La industria de la harina de maíz nixtamalizado emitiría entre 0.9 – 1.9 Tg-CO₂eq en gran parte debido al uso de combustibles fósiles con alto contenido de carbono (e.g. combustóleo). Sin embargo, puesto que la información en la que se sustentan estas estimaciones data del periodo 1950 – 1990, es muy probable que actualmente la industria de la harina de maíz nixtamalizado utilice fuentes de energía con menor contenido de carbono, como el gas natural, emitiendo entonces menos GEI. Según fuentes oficiales, en conjunto las industrias del procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco en México son responsables de alrededor de 2.4 Tg-CO₂eq (INECC, 2012), por lo que es muy probable que las emisiones GEI de la industria de la harina de maíz hayan sido sobreestimadas.

II.4 Conclusiones

El uso de energía y las emisiones GEI de la agroindustria del maíz blanco en México fueron estimadas a partir de información pública disponible en fuentes bibliográficas. Los segmentos examinados de la agroindustria fueron la producción nacional de maíz grano blanco, el transporte interno del grano, el almacenamiento y la conservación del grano, y el procesamiento industrial del grano, incluida la elaboración mecanizada de tortilla de maíz en el sector comercial.

La agroindustria del maíz blanco en México es un sistema complejo que demanda diferentes tipos y cantidades de energía para producir, transportar, almacenar, preservar y procesar el grano en una variedad de productos, fundamentalmente productos alimentarios para consumo humano. Los insumos derivados de recursos energéticos fósiles (e.g. diésel, fertilizantes sintéticos, gas LP y electricidad) son las fuentes de energía dominantes a lo largo de toda la cadena de valor de esta agroindustria. Sin embargo, las formas de energía no comercial (i.e. trabajo humano y animal) hacen una contribución importante a los requerimientos totales de energía, en especial en el cultivo tradicional del maíz grano. La dependencia hacia los combustibles fósiles afecta negativamente el desempeño ambiental de la agroindustria del maíz blanco. Cantidades sustantivas de emisiones de

GEI son arrojadas a la atmósfera por el uso elevado de insumos derivados de recursos energéticos de origen fósil, en particular en los segmentos de producción y procesamiento industrial del maíz grano.

Cabe subrayar que la información pública disponible sobre los requerimientos de energía y la generación de emisiones GEI en los segmentos seleccionados de la agroindustria del maíz blanco es en general escasa, desactualizada, y reporta valores sumamente disímiles. Debido a ello, existe una diferencia notoria (casi 200%) entre los valores mínimo y máximo estimados de uso de energía y las emisiones GEI totales de este sistema agroindustrial. Esta discrepancia subraya la necesidad de llevar a cabo investigación adicional para obtener cifras más exactas y completas. En particular, deben recolectarse o generarse datos más confiables y detallados sobre los segmentos de producción nacional de maíz grano, transporte del grano, y procesamiento industrial, pues son los más intensivos en uso de energía y emisiones GEI.

La agroindustria del maíz blanco en México desempeña una función crítica en términos de producción y suministro de alimentos a la población mexicana. El uso de energía y la emisión de GEI son aspectos clave para la sustentabilidad a largo de esta agroindustria. Dada la relevancia de estos indicadores, es necesario realizar estudios adicionales para obtener estimaciones más completas, precisas y actualizadas específicas para el contexto mexicano.

II.5 Referencias

- Ambriz, J.J., Paredes, H.R., 2009. Uso de la energía en molinos de nixtamal y tortillerías, en: de Teresa, A.P., Viniegra, G. (Eds.), *Temas Selectos de La Cadena Maíz-Tortilla. Un Enfoque Multidisciplinario*. Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa, México D.F., pp. 203–231.
- Bressani, R., 2008. Cambios nutrimentales en el maíz inducidos por el proceso de nixtamalización, en: Rodríguez, M.E.G., Serna-Saldivar, S.O., Sánchez-Sinencio, F. (Eds.), *Nixtamalización Del Maíz a La Tortilla. Aspectos Nutrimentales y Toxicológicos*. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, Qro., pp. 19–80.
- Camarena, M., Salgado, M., 1994. Transporte de las importaciones de gránulos agrícolas. Elementos para su estudio energético, en: Bauer, M., Chong, I., Moreno, E., Quintanilla, J., Torres, F. (Eds.), *El Agua y La Energía En La Cadena Alimentaria. Granos Básicos*. Programa Universitario de Alimentos, UNAM, México D.F., pp. 323–341.
- Cebreros, M., 1997. Innovación y desarrollo industrial. El caso de la harina de maíz, en: Torres-Salcido, G., Morales, M. (Eds.), *Maíz-Tortilla. Política y Alternativas*. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, UNAM, México D.F., pp. 141–155.
- CEDRSSA, 2014. Consumo, distribución y producción de alimentos: el caso del complejo maíz-tortilla. México, D.F., México: Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria; 2014 – Disponible en: <http://www.cedrssa.gob.mx/?idnot=186> [Consultado el 10/06/2015].
- CIA, 1980. El cultivo del maíz en México. México D.F., México: Centro de Investigaciones Agrarias.
- CONEVAL, 2012. Construcción de las líneas de bienestar. Documento metodológico. Metodología para la medición multidimensional de la pobreza. México D.F., México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Disponible en: http://www.coneval.gob.mx/Informes/Coordinacion/INFORMES_Y_PUBLICACIONES_PDF/Construccion_lineas_bienestar.pdf [Consultado el 10/05/2015].
- Cruz, A.L., Martínez, T.S., Omaña, J.M.S., 2004. Fuentes de fuerza, diversidad tecnológica y rentabilidad de la producción de maíz en México. *Cienc. Ergo Sum* 11(3):275–283.
- Cruz, J.D., 2013. Energía y agricultura en México. Tesis Maestría en Ingeniería en Energía. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

- Delucchi, M., 1996. Emissions of criteria pollutants, toxic air pollutants, and greenhouse gases from the use of alternative transportation modes and fuels. Davis, CA: University of California – Davis. Institute of Transportation Studies. Reporte Técnico No. UCD-ITS-RR-96-12.
- Durán-Domínguez, M.C., 1996. La contaminación en la industria de la masa y la tortilla, en: Torres, F. (Ed.), La Industria de La Masa y La Tortilla. Desarrollo y Tecnología. Programa Universitario de Alimentos, UNAM, México D.F., pp. 173–193.
- Estrada, J.L., 1956. Obtención industrial de harina de maíz y proyecto de una fábrica de 50 toneladas diarias de capacidad. Tesis Licenciatura Ingeniería Química. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Facio, M.F., 1991. Proyecto de Factibilidad de una planta procesadora de harina de maíz nixtamalizado en el municipio de Celaya Guanajuato. Tesis Licenciatura en Economía. Facultad de Economía. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Ferrer, J., 1996. Manix: Solución ecológica y económica para los molinos, en: Torres, F. (Ed.), La Industria de La Masa y La Tortilla. Desarrollo y Tecnología. Programa Universitario de Alimentos, UNAM, México D.F., pp. 167–172.
- Garzón, A.E., 2012. Consumo de energía térmica y eléctrica en molinos de nixtamal en México. Proyecto Terminal Ingeniería en Energía. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa, México.
- Gavi, F., 2014. Uso de fertilizantes. Ficha No. 12. Fichas técnicas sobre actividades agrícolas, pecuarias y de traspatio. México D.F., México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/DesarrolloRural/Documents/fichasaapt/Uso%20de%20Fertilizantes.pdf> [Consultado el: 15/06/2015].
- Ghanta, M., Fahey, D., Subramaniam, B., 2014. Environmental impacts of ethylene production from diverse feedstocks and energy sources. Appl. Petrochem. Res. 4(2):167–179.
- Graboski, M.S., 2002. Fossil energy use in the manufacture of corn ethanol. Washington DC, EE.UU.: National Corn Growers Association.
- GRUMA, 2015. Reporte Anual. Nuevo León, México: GRUMA S.A.B. de C.V. Disponible en: https://www.gruma.com/media/611051/reporte_anual_gruma_2014_versi_n_final_con_anexos.pdf [Consultado el: 12/04/2015].
- Hernández, A.J., Márquez, F., Miranda, F., Aguilar, G., Jiménez, J., 1984. Estudio de factibilidad de una planta de harina de maíz. Tesis Ingeniería Mecánica Eléctrica. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Hernández, L.H.N., 2011. Evaluación del potencial de ahorro de energía en México por la sustitución de máquinas tortilladoras. Proyecto Terminal Ingeniería en Energía. Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa, México.
- INECC, 2012. Quinta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México D.F., México.
- INEGI, 2015. Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mapa/denue/> [Consultado el: 03/11/2015].
- INEGI, 2009. Censo agrícola, ganadero y forestal 2007. Tabulados básicos. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/default.aspx?c=17177&s=est> [Consultado el: 04/05/2015].
- IPCC, 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group I: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wgl/en/ch2s2-10-2.html [Consultado el: 12/09/2015].
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: <http://ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> [Consultado el: 19/07/2015].
- Kim, S., Dale, B.E., Keck, P., 2014. Energy requirements and greenhouse gas emissions of maize production in the USA. Bioenerg. Res. 7(2):753–764.

- López, D., 2014. El consumo de productos y subproductos de maíz en México. Enlace 5(17):21–23.
- Masera, O.R., 1990. Crisis y mecanización de la agricultura campesina. El Colegio de México, México D.F., México.
- Masera, O.R., Almeida, R.S., Cervantes, J., Dutt, G.S., García, L., Garza, J.F., Joaquín, R., Juárez, C., Marquez, C., Martínez, M.A., Navia, J., Ortiz, A., Pérez, M., Sheinbaum, C., 1987. El patrón de consumo energético y su diferenciación social. Estudio de caso en una comunidad rural de México. Cuadernos sobre Prospectiva Energética No. 108. El Colegio de México, México D.F., México.
- Mejia, M., Peel, D.S., 2009. White corn and yellow corn production in Mexico: Food versus feed? Anal. Comments 25, 1–10.
- MINSA, 2015. Reporte Anual. Edo. Mex., México: Grupo MINSA, S.A.B. de C.V. Disponible en: http://www.bmv.com.mx/docs-pub/infoanua/infoanua_604917_2014_1.pdf [Consultado el: 12/04/2015].
- Montañez, R., Warman, A., 1982. El cultivo de maíz en México. Diversidad, limitaciones y alternativas. Seis casos de estudio. Centro de Ecodesarrollo, México, D.F., México.
- Moreno, M., 1995. Almacenamiento y conservación de granos en el medio rural, en: Moreno, E., Torres, F., Chong, I. (Eds.), El Sistema Poscosecha de Granos en el Nivel Rural: Problemática y Propuestas. Programa Universitario de Alimentos, UNAM, México D.F., pp. 247–268.
- NRC, 2014. Freight transportation secondary energy use by energy source an transportation mode. Ottawa, Canada. Natural Resources Canada. Disponible en: <http://www.oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/showTable.cfm?type=HB§or=tran&juris=00&rn=8&page=0> [Consultado el: 18/10/2015].
- Orozco, R.Q., 2007. El sistema alimentario del maíz en Pátzcuaro Michoacán. Tesis Maestría en Ciencias Biológicas. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Ortiz, M.A., Ramírez, O., González, J.M., Velázquez, A., 2015. Almacenes de maíz en México: tipología y caracterización. Estud. Soc. 23(45):163–184.
- Pimentel, D., 2003. Ethanol fuels: Energy balance, economics, and environmental impacts are negative. Nat. Resour. Res. 12(2):127–134.
- Pimentel, D., Pimentel, M., 2008. Food, energy and society. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Polanco A.J., Flores T.M., 2008. Bases para una política de I&D e innovación de la cadena de valor del maíz. México D.F., México: Foro Consultivo Científico y Tecnológico.
- Ramírez, G., Viniegra, G., Orozco, C., 2009. El nejayote, su tratamiento y uso, en: de Teresa, A., Viniegra, G. (Eds.), Temas Selectos de la Cadena Maíz-Tortilla. Un Enfoque Multidisciplinario. Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa, México D.F., pp. 233–256.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J.P., García-Casal, M.N., 2014. Global maize production, utilization and consumption. Ann. N. Y. Acad. Sci. 1312:105–112.
- SAGARPA, 2011. Estudio de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional. México D.F., México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/GRANOS.pdf [Consultado el 05/06/2015].
- Santin, H.C., 1985. Consumo y conservación de energía en la industria de la masa y la tortilla. Tesis Licenciatura Químico Farmacéutico Biólogo. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- SENER-AIE, 2011. Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos. México D.F., México: Secretaría de Energía – Agencia Internacional de Energía. Disponible en: http://www.energia.gob.mx/taller/res/1858/iee_mexico.pdf [Consultado el: 09/04/2015].
- SENER, 2014. Balance Nacional de Energía 2013. México D.F., México. Secretaria de Energía. Disponible en: http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/41975/Balance_2013.pdf [Consultado el: 20/07/2015].
- Serna-Saldivar, S., Amaya, C., 2008. El papel de la tortilla nixtamalizada en la nutrición y alimentación, en: Rodríguez, M., Serna-Saldivar, S., Sánchez-Sinencio, F. (Eds.), Nixtamalización Del Maíz a La Tortilla.

- Aspectos Nutrimientales y Toxicológicos. Universidad Autónoma de Querétaro, Qro., México, pp. 105–151.
- Shapouri, H., Duffield, J.A., Wang, M., 2002. The energy balance of corn ethanol: An update. Agricultural Economic Report No. 813. US Department of Agriculture.
- Shapouri, H., Gallagher, P.W., Nefstead, W., Schwartz, R., Noe, S., Conway, R., 2010. 2008 Energy balance for the corn-ethanol industry. Agricultural Economic Report No. 846. US Department of Agriculture.
- Shouse, S., Hanna, M., Petersen, D., 2012. Energy considerations for low temperature grain drying. Agriculture and Environment Extension Publications. Book 200. Disponible en: http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1197&context=extension_ag_pubs [Consultado el: 13/03/2015].
- SIAP, 2015a. Producción agrícola anual por cultivo. México D.F., México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-producción-agricola-por-cultivo/> [Consultado el: 06/03/2015].
- SIAP, 2015b. Balanza disponibilidad-consumo de maíz grano. México, D.F., México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: <http://www.numerosdelcampo.sagarpa.gob.mx/publicnew/productosAgricultivos/cargarPagina/4> [Consultado el 02/03/2015].
- Stanek, W., Bialecki, R., 2014. Can natural gas warm the climate more than coal? Fuel 136, 341–348.
- Toledo, V.M., Carabias, J., Toledo, C., González, C., 1989. Producción rural de México: Alternativas ecológicas. Fundación Universo XXI, México D.F., México.
- Torres, F., 1997. Dinámica económica de la industria alimentaria y patrón de consumo en México. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, México D.F., México.
- Torres, F., 1994. La agroindustria del maíz en México. El espacio y el dilema entre tradición y modernismo: El caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Probl. Desarro. 25(98), 203–233.
- Trinidad, A., 2014. Utilización de Estiércoles. Ficha No. 7. Fichas técnicas sobre actividades agrícolas, pecuarias y de traspatio. México D.F., México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasaapt/Utilizaci%C3%B3n%20de%20esti%C3%A9rcoles.pdf> [Consultado el: 26/09/2015].
- Vega, V., Ramírez, M., 2008. Situación y perspectivas del maíz en México, en: Polanco, A., Flores, T. (Eds.), Bases Para Una Política de I&D e Innovación de La Cadena de Valor Del Maíz. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, México, D.F., pp. 50–80.
- Villarespe, V., 1985. Aspectos económicos y tecnológicos en la agroindustria alimentaria mexicana: el caso de los cereales. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, México D.F., México.
- WBG, 2015. Population Data. Mexico. The World Bank Group. Disponible en: <http://data.worldbank.org/country/mexico> [Consultado el: 10/06/2015].
- Yang, Q., Chen, G.Q., 2012. Nonrenewable energy cost of corn-ethanol in China. Energy Policy 41:340–347.

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

CAPÍTULO III

Uso de energía para riego y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas en la producción de maíz de riego en México²

Resumen

El maíz es el cereal más importante cultivado en México, y más de un tercio de la producción nacional de maíz proviene de parcelas irrigadas. Se estimó el uso de energía para riego y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas para diferentes sistemas de producción de maíz de riego en México. Los cálculos se basaron en los microdatos del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007, los requerimientos de agua de riego estimados a partir de registros climáticos de las diferentes entidades federativas, y los coeficientes energéticos y de emisiones tomados de la bibliografía. Los promedios ponderados (por superficie sembrada) de uso de energía para riego y emisiones de GEI asociadas se estimaron en el rango de 1.0 – 31.6 GJ ha⁻¹ y 62.0 – 2,019.9 kg CO₂e ha⁻¹, respectivamente, mientras que los totales calculados a escala nacional ascendieron a 4.8 PJ y 305.2 Gg CO₂e.

III.1 Introducción

El riego tiene una importancia capital en la producción agrícola moderna. Si bien menos de 20% de la superficie agrícola en el mundo es irrigada, de ésta se obtiene aproximadamente 40% de la cosecha agrícola global (Khan y Hanjra, 2009). La productividad excepcional de los sistemas agrícolas bajo riego normalmente se consigue a costa del uso intensivo de recursos naturales. El riego agrícola es responsable de alrededor de 70% de las extracciones de agua fresca y 90% del uso consuntivo de agua fresca a nivel mundial (Allan et al., 2015; Siebert et al., 2010). Además, la extracción, transporte y aplicación del agua de riego demandan cantidades sustantivas de energía (Rothausen y Conway, 2011). El uso de energía para riego puede representar hasta cerca de la mitad de los requerimientos totales de energía en sistemas de producción agrícola bajo riego (Canakci et al., 2005; Jackson et al., 2010; Rodrigues et al., 2010; Singh et al., 2002). Asimismo, debido a su alta dependencia de los energéticos de origen fósil, el riego agrícola también es una fuente importante de gases de efecto invernadero (GEI), por lo que contribuye al calentamiento global y al cambio climático (Lal, 2004; Rothausen y Conway, 2011).

En México, el uso consuntivo de agua fresca en el sector agropecuario asciende a cerca de 65.4 km³, que equivalen a 76% de las extracciones totales de agua a nivel nacional (CONAGUA, 2016). La mayor parte de este volumen de agua se destina al riego agrícola, principalmente para la producción de cereales, los cuales concentraron casi la mitad de la superficie cosechada bajo riego en el periodo 2013-2014 (i.e. 6.4 millones de ha) (CONAGUA, 2015a, 2015b). Una porción considerable la superficie agrícola irrigada se dedica al cultivo de maíz grano (*Zea mays* L.), el cereal más importante de consumo básico en México. El maíz fue domesticado originalmente por los antiguos pobladores mexicanos hace 5,000 – 10,000 años, en la región suroccidental del actual territorio nacional (Wang

² Basado en el trabajo: Juárez-Hernández, S. and Sheinbaum, C., 2018. Irrigation energy use and related greenhouse gas emissions of maize production in Mexico. *International Journal of Water Resources Development*, DOI: 10.1080/07900627.2018.1482739.

et al., 1999). El maíz se produce bajo diversas condiciones agro-climáticas y prácticas de manejo, desde la producción campesina de subsistencia hasta la producción comercial intensiva en insumos agrícolas (Mejía y Peel, 2009; Montañez y Warman, 1982; Toledo et al., 1989). El maíz blanco es la variedad principal de maíz sembrada en México, y se utiliza mayoritariamente para consumo humano directo, pues más de 55% (aproximadamente 12 Tg) de la producción total nacional es procesada en productos alimentarios para consumo humano (SIAP, 2017a). En consecuencia, el consumo humano de maíz en México es uno de los más altos en todo el mundo, alcanzado 267 g por persona por día (Ranum et al., 2014). En el periodo 1980 – 2012, la superficie sembrada promedio anual con maíz grano ascendió a cerca de 8.2 millones de ha y la producción total a aproximadamente 17.1 Tg (SIAP, 2017b), la cual coloca a México entre los cinco mayores productores de maíz en el mundo (Ranum et al., 2014). Si bien sólo 15.2% (1.2 millones de ha) de la superficie nacional de maíz es irrigada, ésta aporta más de un tercio (alrededor de 6.1 Tg) de la producción nacional de maíz grano, con un rendimiento promedio cercano a 5.0 Mg ha⁻¹ comparado con menos de 2.0 Mg ha⁻¹ de la producción de temporal (SIAP, 2017b). La expansión de la producción de maíz bajo riego podría entonces considerarse como una opción para incrementar la productividad de la superficie de maíz en vista de la creciente demanda de alimentos y las limitaciones en la disponibilidad de tierra arable. No obstante, las implicaciones de esta alternativa en términos de las demandas adicionales de agua y energía, así como los impactos ambientales de las operaciones de riego deben ser apropiadamente ponderadas.

Varios estudios han cuantificado el uso de energía para riego y las emisiones de GEI asociadas en la producción de maíz grano en distintos sitios, reportando valores que fluctúan en los rangos de 2.8 – 22.9 GJ ha⁻¹ y 0.8 – 3.6 Mg CO₂e ha⁻¹, respectivamente (Grassini y Cassman, 2012; Reddy et al., 2015; Rodrigues et al., 2010; Singh et al., 2003; Topak et al., 2009). Estos rangos amplios resultan de diferencias en los métodos de aplicación del agua de riego, los requerimientos de agua de riego, las fuentes de agua de riego, las condiciones ambientales, y los combustibles usados en los sistemas de bombeo y riego. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo estudios específicos para cada tipo de cultivo y localidad a fin de obtener estimaciones más exactas. En el caso de la producción de maíz bajo riego en México, los estudios existentes sobre el uso de energía para riego y las emisiones de GEI asociadas son escasos y en general de alcance geográfico limitado (Hennecke et al., 2016; Scott, 2013). La competencia creciente por los recursos energéticos y las reservas de agua, sumado a los efectos adversos ocasionados por su uso ineficiente, apuntan a la necesidad de evaluar las implicaciones ambientales de las operaciones de riego a modo de contribuir al diseño y promoción de prácticas agrícolas más sustentables. De ahí que, el propósito de este trabajo es estimar el uso de energía para riego y las emisiones de GEI asociadas en diferentes sistemas de producción de maíz con riego en México por hectárea sembrada y también a nivel nacional en base a la superficie sembrada bajo cada sistema de producción.

III.2 Metodología y fuentes de información

III.2.1 Sistemas de producción de maíz con riego

Los sistemas de producción de maíz con riego examinados fueron seleccionados en base a la clasificación de los sistemas de producción agrícola propuesta por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SIAP, 2008). Esta clasificación se sustenta en tres características técnicas: (i) fuente de humedad (temporal, T; riego por gravedad, G; riego por bombeo, B); (ii) tipo de semilla (semilla criolla, C; semilla mejorada, M); y (iii) uso de fertilizantes

sintéticos (sin fertilizantes, S; con fertilizantes, F). Así entonces, el presente análisis se enfocó en ocho sistemas de producción de maíz bajo riego (**Tabla III.1**).

Tabla III.1. Sistemas de producción de maíz con riego según (SIAP, 2008).

Sistema de producción	Descripción
GCS	Riego por gravedad, semilla criolla, sin fertilizantes sintéticos
GMS	Riego por gravedad, semilla mejorada, sin fertilizantes sintéticos
GCF	Riego por gravedad, semilla criolla, con fertilizantes sintéticos
GMF	Riego por gravedad, semilla mejorada, con fertilizantes sintéticos
BCS	Riego por bombeo, semilla criolla, sin fertilizantes sintéticos
BMS	Riego por bombeo, semilla mejorada, sin fertilizantes sintéticos
BCF	Riego por bombeo, semilla criolla, con fertilizantes sintéticos
BMF	Riego por bombeo, semilla mejorada, con fertilizantes sintéticos

III.2.2 Superficie sembrada y características técnicas principales de los sistemas de producción de maíz con riego

Esta información se estimó a partir de los microdatos del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007, el último disponible (SNIEG, 2016). Los microdatos están reportados por unidad de producción, para el año agrícola 2006-2007, y separados para los ciclos de producción primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI). Para los propósitos de este trabajo, se emplearon nueve variables de los microdatos: (i) ubicación; (ii) superficie sembrada y producción por cultivo; (iii) superficie sembrada con aplicación de fertilizantes sintéticos; (iv) superficie sembrada con semilla mejorada; (v) superficie sembrada de temporal; (vi) superficie sembrada bajo riego; (vii) método de riego; (viii) fuente de agua para riego; y (ix) tipo de agua para riego. Los métodos de riego incluyeron canales recubiertos, canales de tierra, aspersión, micro-aspersión, goteo, y otro método. Las fuentes de agua para riego incluyeron bordo, pozo profundo, pozo a cielo abierto, río, manantial, presa, y otra fuente. Los tipos de agua para riego incluyeron agua blanca, agua negra, agua tratada, y otro tipo. En el caso del agua de pozo profundo, también se recopiló la profundidad de bombeo (en m). Las unidades de producción que sembraron maíz grano simultáneamente con otros cultivos fueron excluidas del análisis dado que la mayoría de las variables de los microdatos están agregadas por unidad de producción y su desagregación por cultivo es inviable. Por lo tanto, sólo las unidades de producción que sembraron exclusivamente maíz grano fueron tomadas en cuenta, por lo que la superficie estimada corresponde a la superficie en monocultivo de maíz.

Dado que la superficie sembrada total en una unidad de producción normalmente se compone de parcelas con distintas combinaciones de tipo de semillas, uso de fertilizantes, y métodos de riego, se establecieron las siguientes suposiciones para estimar la superficie sembrada y las características técnicas principales de cada sistema de producción de maíz bajo riego:

1. La superficie sembrada con semilla mejorada tuvo preferencia en la distribución de la superficie sembrada con aplicación de fertilizantes sintéticos. Se asumió que la diferencia entre la superficie sembrada total y la superficie sembrada con semilla mejorada corresponde a la superficie sembrada con semilla criolla. Así, se determinó la superficie sembrada para cada combinación de tipo de semilla × aplicación de fertilizante sintético, es decir, CS, CF, MS, y MF.

2. El área total irrigada se distribuyó entre las combinaciones anteriores de tipo de semilla × aplicación de fertilizante sintético en el siguiente orden: MF, CF, MS, y CS. Este orden pretendió reflejar un rendimiento potencial decreciente. Así, se asumió que el riego se aplica preferentemente a la superficie sembrada con el mayor rendimiento potencial, o sea, la superficie sembrada con semilla mejorada y aplicación de fertilizantes sintéticos.
3. La superficie total irrigada en cada unidad de producción se distribuyó de manera equitativa entre los diferentes métodos de riego utilizados. Por ejemplo, si se determinaron 10 ha de superficie irrigada en la combinación MF para una unidad de producción que reportó el uso conjunto de micro-aspersión y riego por goteo, entonces 5 ha fueron asignadas a riego por micro-aspersión y 5 ha a riego por goteo. Los canales recubiertos y los canales de tierra fueron considerados como métodos de riego por gravedad, en tanto que el riego por aspersión, micro-aspersión, goteo, y otro método de riego fueron considerados como métodos de riego por bombeo (i.e. presurizado). De esta manera se estimó el uso relativo de los diferentes métodos de riego y la superficie sembrada bajo cada combinación de tipo de semilla × aplicación de fertilizante sintético × método de riego, es decir, GCS, GCF, GMS, GMF, BCS, BCF, BMS, y BMF.
4. La contribución relativa de las diferentes fuentes y tipos de agua para riego fue estimada de una manera similar a la descrita en la suposición 3. En el caso del agua de pozo profundo, se calculó también la profundidad de bombeo promedio.

Los cálculos anteriores se realizaron para cada unidad de producción y después se agregaron por sistema de producción de maíz, entidad federativa, y ciclo de producción.

III.2.3 Requerimientos de agua de riego

Dado que se carece de datos detallados, confiables y de alcance nacional sobre el uso de agua de riego específicamente en la producción de maíz grano en México, los cálculos en el presente estudio se basaron en estimaciones de los requerimientos de agua para riego del maíz. Primero, se determinaron los requerimientos netos de agua de riego (NI_{req} , i.e. la demanda de agua de riego de la planta de maíz) mediante el programa *CropWat* (FAO, 2010) usando la opción '*requerimientos de agua de los cultivos*', en la cual los NI_{req} se determinan como la diferencia entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la precipitación efectiva (P_{ef}) ambas calculadas a partir de datos climáticos.

Los registros climáticos mensuales (i.e. temperaturas mínima y máxima, humedad relativa, velocidad del viento promedio, y precipitación) de cada entidad federativa fueron tomados de la Red Nacional de Estaciones Agro-meteorológicas operada por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2017). En total se recopilieron los registros climáticos de 401 estaciones agro-meteorológicas instaladas a lo largo de todo el país. Debido a una capacidad de procesamiento limitada, únicamente se utilizaron los registros de un periodo de dos años, considerando 2006-2007 como el periodo de referencia a modo de ser consistente con los microdatos del Censo. Téngase en cuenta que para algunas entidades federativas los registros climáticos para el periodo de referencia no estaban disponibles o estaban demasiado incompletos, por lo que se utilizaron registros de otros años, los más cercanos al periodo de referencia. Así, para el periodo de referencia se recolectaron los registros climáticos de 183 estaciones en 11 estados del país; para el periodo 2007-2008, de 90 estaciones en siete estados; para el periodo 2008-2009, de 67 estaciones en seis estados; y para el periodo 2009-2010, de 61 estaciones en cuatro estados. No

hubo registros disponibles para cuatro entidades (i.e. Baja California, Distrito Federal, México, y Querétaro) por lo cual éstas fueron excluidas del análisis. Los datos faltantes en los registros climáticos de una estación dada fueron estimados mediante el método del recíproco del cuadrado de la distancia ponderada a un grupo de estaciones vecinas (Hartkamp et al., 1999; Oktavia et al., 2016), utilizando los datos de hasta cuatro estaciones vecinas. Los registros climáticos mensuales para el periodo de dos años fueron promediados para cada estación agro-climática e introducidos, junto con los datos de altitud, latitud y longitud de cada estación, en el programa *CropWat* para así estimar las horas de insolación y la radiación solar diaria, y con éstas la evapotranspiración de referencia (ET_o).

Los datos estimados de la precipitación promedio mensual también fueron introducidos en el programa *CropWat* para determinar la P_{ef} usando el método del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los EE.UU. Los parámetros de la planta de maíz disponibles por defecto en el programa *CropWat* (i.e. K_c , duración de las etapas de desarrollo, profundidad de raíces, etc.) fueron usados para determinar la ET_c . En el ciclo de producción PV, la siembra del maíz ocurre entre abril - septiembre y la cosecha entre junio – marzo, mientras que para el ciclo OI la siembra se realiza entre octubre – marzo y la cosecha entre diciembre – septiembre (SIAP, 2007). A modo de simplificar el análisis, las fechas de siembra y cosecha del maíz en el ciclo PV se establecieron el 30 de junio y el 1 de noviembre, respectivamente, en tanto que las correspondientes al ciclo OI se fijaron el 30 de noviembre y el 18 de marzo.

Los Nl_{req} promedio por entidad federativa y ciclo de producción se estimaron considerando los valores calculados para el conjunto estaciones agro-meteorológicas seleccionadas en cada entidad.

III.2.4 Uso de energía para riego y emisiones de GEI asociadas

El cálculo del uso de energía para riego y las emisiones de GEI asociadas (i.e. dióxido de carbono, CO_2 ; óxido nitroso, N_2O ; y metano, CH_4) se limitó a aquellos relacionados con el bombeo de agua de pozo profundo y la aplicación del agua de riego a los campos de cultivo. Si bien el suministro de agua para riego engloba muchas otras operaciones, la extracción de agua para riego, en particular la extracción de pozo profundo, y la aplicación del agua de riego a los cultivos son típicamente las operaciones más intensivas en energía y emisiones de GEI (Rothausen y Conway, 2011).

III.2.4.1 Aplicación del agua de riego a los campos de cultivo

En los sistemas de riego presurizado, el uso de energía para la aplicación del agua de riego se estimó con la ecuación siguiente (Rothausen y Conway, 2011):

$$E = \frac{g \times L \times m_{agua}}{3.6 \times \eta_{bomba} \times \eta_{motor}} \quad (III.1)$$

Donde E representa el uso de energía en kWh, g es la aceleración de la gravedad (9.8 m s^{-2}), L es la elevación en m, m_{agua} es la masa de agua de riego aplicada en kg ($\rho = 1,000 \text{ kg m}^{-3}$), y η_{bomba} y η_{motor} son las eficiencias de la bomba y el motor, respectivamente. En este caso, L fue reemplazada por la presión de operación más las pérdidas de presión del sistema de riego, ambas medidas en m- H_2O (Tabla III.2). La m_{agua} correspondió al agua de riego aplicada (I , i.e. volumen total de agua de riego

aplicada al campo de cultivo), la cual fue determinada a partir de los NI_{req} y las eficiencias típicas de aplicación de los métodos de riego considerados (**Tabla III.2**). Cabe mencionar que se asumió que la I fue re-presurizada sin importar la fuente de agua para riego. La mezcla de energéticos para los sistemas de riego se asumió igual a 93% electricidad y 7% diésel (CONUEE-GIZ, 2011). Se utilizaron valores típicos de las eficiencias de la bomba, motor eléctrico, y motor de diésel (65%, 80%, y 63%, respectivamente) (Phocaidés, 2000).

Tabla III.2. Valores típicos de la presión de operación (P_{op}), pérdidas de presión (P_{per}), eficiencia de aplicación (e_a), y mano de obra asociadas a los métodos de riego presurizado.

	P_{op}	P_{per}	e_a	Mano de obra ^g
Método de riego	[m-H ₂ O]	[m-H ₂ O]	[%]	[MJ ha ⁻¹]
Aspersión ^a	47.50 ^c	22.80 ^e	71 ^f	1.09
Micro-aspersión	20.40 ^d	12.75 ^d	80 ^d	0.26
Riego por goteo	10.20 ^d	16.83 ^d	90 ^d	0.26
Otro método ^b	25.49 ^d	12.24 ^d	75 ^d	3.14

^a Cañón viajero. ^b Aspersor portátil. ^c Tomados de (Lázaro et al., 2010). ^d Tomados de (Phocaidés, 2000). ^e Cálculo propio. ^f Tomado de (Peña, 2007). ^g Valores calculados a partir de las horas de trabajo por hectárea tomadas de (Ojeda y Herrera, 2000) y 1.28 MJ h⁻¹ de trabajo (Haswell, 1981).

Los equivalentes energéticos y de emisiones de GEI de la electricidad y el diésel incluyeron el uso de energía y las emisiones GEI *aguas arriba*. Los valores para la electricidad (9.9 MJ kWh⁻¹; 0.6 kg CO₂ kWh⁻¹; 4.4×10^{-6} kg N₂O kWh⁻¹; 8.8×10^{-4} kg CH₄ kWh⁻¹) se estimaron considerando la mezcla de combustibles y la eficiencia de generación promedio del periodo 2004-2008 (SIE, 2017a), la energía y las emisiones de GEI *aguas arriba* de los combustibles fósiles utilizados (GREET, 2015), y las pérdidas de electricidad por transmisión, transformación y distribución (6% de la electricidad generada) (CFE, 2014). Los valores para el diésel (42.8 MJ L⁻¹; 8.5×10^{-2} kg CO₂ MJ⁻¹; 2.9×10^{-5} kg N₂O MJ⁻¹; 7.2×10^{-5} kg CH₄ MJ⁻¹) se tomaron de la bibliografía (GREET, 2015; INECC, 2014; IPCC, 2006) e incluyeron las emisiones de GEI *in-situ* y las relacionadas al procesamiento del diésel. La mano de obra para la operación de los sistemas de riego presurizado también fue tomada en cuenta (**Tabla III.2**). Asimismo, se incorporó el uso de energía y las emisiones GEI asociadas a la fabricación de los equipos para riego presurizado, según valores disponibles en la bibliografía (**Tabla III.3**). Las emisiones de GEI se convirtieron a CO₂ equivalente (CO₂e) empleando los potenciales de calentamiento global mundial a 100 años (i.e. 1 para CO₂, 298 para N₂O, y 25 para CH₄) (IPCC, 2007).

En el caso de los sistemas de riego por gravedad, la I se estimó a partir de los NI_{req} considerando una eficiencia de aplicación de 66% (Peña, 2007). Se asumió además que la energía para la aplicación del agua de riego es proporcionada por la fuerza de gravedad, por lo que sólo se contabilizó la mano de obra asociada, aproximadamente 2.60 MJ ha⁻¹ (Haswell, 1981; Ojeda y Herrera, 2000). El uso de energía y las emisiones de GEI relacionadas con la fabricación del equipo de riego fueron ignoradas debido a la falta de información relevante. Téngase en cuenta que investigaciones previas sugieren que, tratándose de sistemas de riego por gravedad, la contribución de este componente al total de uso de energía para riego y emisiones de GEI es marginal (Acharya et al., 2015).

El uso relativo, en porcentaje, de los métodos de riego estimado para cada sistema de producción de maíz, entidad federativa, y ciclo de producción se utilizó para calcular los promedios ponderados de la I y del uso de energía y las emisiones de GEI asociados a la aplicación del agua de riego.

Tabla III.3. Energía y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la fabricación de equipo para riego presurizado.

	Uso de energía		Emisiones de GEI					
	[MJ ha ⁻¹ año ⁻¹]		[kg GEI ha ⁻¹ año ⁻¹]					
	Con motor eléctrico	Con motor de diésel	Con motor eléctrico			Con motor de diésel		
			CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
Aspersión	841.39	804.05	36.06	4.80×10^{-4}	4.45×10^{-2}	32.71	4.36×10^{-4}	4.03×10^{-2}
Micro-aspersión	4,214.51	4,189.65	9.28	1.24×10^{-4}	1.14×10^{-2}	7.05	9.39×10^{-5}	8.69×10^{-3}
Riego por goteo	4,214.51	4,189.65	9.28	1.24×10^{-4}	1.14×10^{-2}	7.05	9.39×10^{-5}	8.69×10^{-3}
Otro método	1,077.07	1,045.25	76.00	1.01×10^{-3}	9.37×10^{-2}	73.15	9.74×10^{-4}	9.02×10^{-2}

^a Cañón viajero. ^b Pivote central. ^c Valores estimados a partir de (Batty y Keller, 1980). ^d Valores estimados a partir de la mezcla de energéticos para la fabricación de equipo para riego según (West y Marland, 2002) y los factores de emisión por defecto según (GREET, 2015; IPCC, 2006).

III.2.4.2 Extracción de agua de riego de pozo profundo

El uso de energía y las emisiones GEI asociadas a la extracción de agua de riego de pozo profundo se estimaron a partir de los requerimientos brutos de agua de riego (I_{bruto} , i.e. el volumen total de agua extraída incluyendo las pérdidas por conducción, distribución y aplicación). Los I_{bruto} fueron calculados en base a los NI_{req} estimados y las eficiencias de conducción, distribución y aplicación. Para las eficiencias de distribución, se asumieron los valores siguientes: 75% para canales de tierra, 90% para canales recubiertos, y 98% para tubería (Peña, 2007), esta última sólo se consideró para los sistemas de riego presurizado. Las eficiencias de conducción variaron en función de la fuente de agua para riego. En el caso del agua de riego procedente de presas y ríos, se asumió un valor de 65% (Pedroza y Hinojosa, 2014; Peña, 2007) mientras que para las otras fuentes de agua de riego se asumió 90%. Debido a la falta de información relevante, se ignoró el uso de energía y las emisiones de GEI relacionadas con la conducción y la distribución del agua de riego.

Los I_{bruto} se estimaron para cada combinación de método de riego × fuente de agua de riego, y luego se emplearon los valores estimados de uso relativo (en porcentaje) de los métodos de riego y fuentes de agua de riego para cada sistema de producción de maíz, entidad federativa y ciclo de producción para así calcular un promedio ponderado de los I_{bruto} . Luego, la fracción de estos últimos correspondiente al agua extraída de pozo profundo y el valor promedio de la profundidad de extracción se utilizaron en la **Ec. (III.1)** para estimar el uso de energía en la extracción de agua de pozo profundo. Se asumieron los mismos valores de la mezcla de energéticos, las eficiencias de la bomba y el motor, y los equivalentes de energía y emisiones de GEI de la electricidad y el diésel antes mencionados. El uso de energía y las emisiones de GEI asociados a la fabricación de la planta de bombeo del agua de pozo profundo fueron ignorados debido a la carencia de la información necesaria. Todas las estimaciones anteriores se efectuaron para cada sistema de producción de maíz, entidad federativa, y ciclo de producción.

El uso de energía y las emisiones de GEI relacionados con la aplicación del agua de riego, la extracción de agua de pozo profundo, la fabricación del equipo de riego presurizado, y la mano de obra asociada se sumaron para así obtener el uso total de energía para riego ($IrrE$, en MJ ha⁻¹) y las emisiones de GEI asociadas ($IrrGEI$, en kg CO₂e ha⁻¹) por hectárea cultivada. Adicionalmente, se computaron los siguientes indicadores: $IrrE_s$ (en MJ m⁻³), calculado como el uso total de energía para

riego dividido por el volumen de agua de riego aplicado; $IrrGEI_s$ (en $\text{kg CO}_2\text{e m}^{-3}$), calculado como las emisiones de GEI totales divididas entre el volumen de agua de riego aplicado; y PAR (en kg grano m^{-3}) o productividad del agua de riego, calculada como la masa de maíz grano producido por unidad de volumen de agua de riego aplicado. Excepto por la PAR , los indicadores anteriores se obtuvieron para cada sistema de producción de maíz, entidad federativa, y ciclo de producción. Nótese que, debido a limitaciones de espacio, sólo se reportan los promedios ponderados (por superficie sembrada) a nivel nacional. En el caso de la PAR , sólo se consideraron los sistemas de producción de maíz y las entidades federativas cuyos datos de rendimiento de producción estaban disponibles en (SIAP, 2008), y se calcularon promedios simple por sistema de producción de maíz y ciclo de producción.

III.2.5 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar la influencia de variables seleccionadas en los valores estimados de $IrrE$ e $IrrGEI$. Las variables seleccionadas fueron: (i) los NI_{req} , (ii) el uso relativo de los métodos de riego, (iii) la eficiencia global del sistema de bombeo (i.e. bomba y motor), (iv) la I , y (v) el uso de energía y las emisiones de GEI asociadas a la fabricación del equipo de riego. El valor de cada una de estas variables se cambió *ceteris paribus* en un rango de $\pm 25\%$ para observar el cambio relativo en $IrrE$ e $IrrGEI$ para un sistema de producción de maíz con riego por gravedad y un sistema de producción de maíz con riego presurizado. En el caso del sistema de producción con riego por gravedad, el cambio en el uso relativo de métodos de riego se hizo modificando el uso relativo de los canales de tierra y ajustando el uso relativo de los canales recubiertos para obtener 100%. De manera similar, en el caso del sistema de producción de maíz con riego presurizado, se modificó el valor del uso relativo del riego por aspersión y se modificaron en concordancia los valores del uso relativo de los demás métodos de riego. Los cambios relativos en los valores de $IrrE$ e $IrrGEI$ debido a los cambios en las variables seleccionadas se graficaron para identificar aquellas con mayor influencia en $IrrE$ e $IrrGEI$.

III.3 Resultados y discusión

III.3.1 Superficie sembrada por sistema de producción de maíz con riego

La superficie sembrada total de maíz (monocultivo) de riego se estimó en aproximadamente 683,250 ha en el ciclo PV y 232,230 ha en el ciclo OI. La superficie sembrada de los ocho sistemas de producción de maíz de riego aquí considerados ascendió a cerca de 659,200 ha y 227,780 ha, respectivamente. La diferencia corresponde a la superficie sembrada en unidades de producción que reportaron el uso conjunto de métodos de riego por gravedad y presurizado (i.e. por bombeo) (**Tabla III.4**). Los cuatro sistemas de producción de maíz con riego por gravedad acumularon casi 80% y 94% del total de la superficie sembrada de maíz de riego calculadas para los ciclos PV y OI, respectivamente. En particular, los sistemas de producción GMF y GCF concentraron más de 64% y 90% de la superficie sembrada estimada total de maíz bajo riego en los ciclos PV y OI. Con respecto a los sistemas de producción de maíz con riego presurizado, los sistemas de producción BMF y BCF aparecieron como los más importantes en términos de superficie sembrada, pues en conjunto abarcaron alrededor de 14% y 3% de la superficie sembrada total de maíz bajo riego calculada para los ciclos PV y OI, respectivamente. La superficie sembrada estimada para cada sistema de

producción de maíz por entidad federativa y ciclo de producción se encuentra en las **Tablas III.5 y III.6**.

Tabla III.4. Superficie sembrada total estimada por sistema de producción de maíz de riego y ciclo de producción (año agrícola 2006-2007).

Sistema de producción ^a	Ciclo PV ^c		Ciclo OI ^d	
	[× 10 ³ ha]	[%]	[× 10 ³ ha]	[%]
GCS	87.52	12.81	6.23	2.68
GMS	16.08	2.35	1.97	0.85
GCF	158.68	23.22	19.89	8.57
GMF	280.94	41.12	190.56	82.06
BCS	19.38	2.84	1.29	0.55
BMS	2.81	0.41	0.36	0.15
BCF	27.95	4.09	1.96	0.84
BMF	65.85	9.64	5.52	2.38
Otro ^b	24.05	3.52	4.45	1.92
Total nacional	683.25	100.00	232.23	100.00

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b Unidades de producción de maíz que reportaron el uso conjunto de métodos de riego por gravedad y por bombeo (presurizado). ^c Primavera – verano. ^d Otoño – invierno.

Según cifras reportadas por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), la superficie total sembrada de maíz bajo riego fue aproximadamente 754,980 ha en el ciclo 2007 PV y 666,980 ha en el ciclo 2006 OI (SIAP, 2017c). Las discrepancias con los valores aquí estimados podrían explicarse en parte por la exclusión de la superficie de las unidades de producción que sembraron maíz grano simultáneamente con otros cultivos. No obstante, en el caso de la superficie sembrada estimada para el ciclo OI, la diferencia es muy amplia para ser explicada solamente por esta omisión. Nótese que diferencias de magnitud similar se observan al comparar las cifras de superficie sembrada total de maíz grano. La SAGARPA reporta cerca de 6.9 millones de ha en el ciclo 2007 PV y 1.1 millones de ha en el ciclo 2006 OI, en tanto las cifras derivadas del Censo suman aproximadamente 7.9 millones de ha para el ciclo PV y sólo 0.6 millones de ha para el ciclo OI (INEGI, 2009). Otros factores como variaciones en los métodos de estimación y recolección de datos podrían estar detrás de estas diferencias. Sin embargo, podría argumentarse que los microdatos del Censo son más confiables pues consisten en información recabada directamente de las unidades de producción a lo largo de todo el país.

III.3.2 Características técnicas principales de los sistemas de producción de maíz con riego

Los canales de tierra serían el método de riego dominante en los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad. Se determinó que alrededor de 70% - 80% de la superficie sembrada total bajo estos sistemas de producción de maíz calculada para el ciclo PV y 80% - 90% de aquella para el ciclo OI utiliza canales de tierra como método de riego (**Tabla III.7**). El uso menor de canales recubiertos podría atribuirse a su mayor costo económico y complejidad de construcción en comparación con los canales de tierra.

Tabla III.5. Superficie sembrada estimada por sistema de producción de maíz con riego y entidad federativa para el ciclo de producción primavera – verano. Cifras en [ha].

Estado de la República	Sistema de producción ^a									Total estatal
	GCS	GMS	GCF	GMF	BCS	BMS	BCF	BMF	Otro ^b	
Aguascalientes	1,266.7	323.6	2,390.9	3,380.0	667.0	255.3	730.7	3,451.2	800.2	13,265.6
Baja California	37.9	9.2	86.5	22.8	120.0	-	44.7	201.2	2.0	524.3
Baja California Sur	483.6	5.4	93.1	68.0	348.3	24.3	821.6	2,444.3	124.0	4,412.6
Campeche	84.7	7.1	71.1	150.0	83.1	6.5	102.9	346.2	11.6	863.2
Coahuila	1,568.7	272.7	94.5	482.1	185.0	96.0	26.4	695.8	2.8	3,424.0
Colima	212.2	14.2	535.4	448.6	125.4	65.1	194.9	102.6	113.7	1,812.1
Chiapas	1,938.7	5.4	1,962.8	1,898.0	469.7	0.5	160.6	285.9	50.4	6,772.0
Chihuahua	3,092.2	207.5	3,319.8	8,095.9	1,338.3	92.8	6,339.9	13,862.6	1,540.3	37,889.3
Distrito Federal	6.8	0.3	2.5	-	20.1	-	4.6	3.4	20.0	57.7
Durango	3,096.7	422.5	4,936.6	7,577.4	374.4	37.3	311.0	2,281.5	993.7	20,031.1
Guanajuato	2,999.5	435.7	6,369.8	34,105.4	2,183.4	409.0	2,840.5	17,741.5	5,386.0	72,470.8
Guerrero	2,252.1	39.3	2,415.8	3,163.0	1,860.2	22.3	552.0	361.7	157.3	10,823.7
Hidalgo	10,579.2	6,243.1	4,925.1	10,925.3	745.9	275.4	601.8	301.2	853.6	35,450.6
Jalisco	2,320.5	380.2	5,021.8	17,490.2	1,670.5	266.5	4,002.3	10,048.2	2,535.6	43,735.8
México	9,243.9	748.7	48,771.3	4,768.1	244.3	13.6	1,004.5	164.5	485.6	65,444.5
Michoacán	7,097.0	358.3	20,983.6	27,900.9	501.3	78.8	1,429.0	3,096.0	3,134.9	64,579.8
Morelos	290.4	34.2	877.8	1,313.1	68.1	0.7	63.6	121.2	105.4	2,874.5
Nayarit	173.8	20.1	234.3	1,171.8	306.4	87.6	650.0	586.5	167.6	3,398.1
Nuevo León	2,768.0	179.3	137.6	37.3	831.8	68.7	118.3	272.9	224.0	4,637.9
Oaxaca	3,667.3	90.4	7,638.9	358.2	1,026.3	67.7	1,284.7	282.7	223.4	14,639.6
Puebla	4,712.8	647.4	10,930.5	5,386.3	528.9	57.2	1,987.2	932.4	511.6	25,694.3
Querétaro	2,444.4	388.6	7,956.2	4,068.7	1,089.8	309.9	1,283.6	3,122.5	805.6	21,469.3
Quintana Roo	37.5	5.5	16.0	185.8	36.0	0.8	31.0	63.0	10.7	386.3
San Luis Potosí	4,912.3	1,034.7	965.6	1,346.1	820.6	80.9	362.9	477.1	359.8	10,360.0
Sinaloa	3,538.5	1,271.3	14,210.2	103,305.0	127.8	66.7	681.4	1,706.2	4,416.5	129,323.6
Sonora	668.0	998.1	1,652.8	6,980.3	14.1	-	20.6	54.9	271.3	10,660.1
Tabasco	119.7	142.0	-	2.5	212.1	18.1	35.4	198.2	3.1	731.1
Tamaulipas	4,795.7	1,138.7	3,517.5	32,389.6	91.8	5.2	61.4	509.6	382.9	42,892.4
Tlaxcala	482.7	17.4	1,583.6	265.0	73.3	50.4	831.3	323.7	16.4	3,643.8
Veracruz	889.5	173.0	1,539.5	538.0	599.8	18.5	299.4	339.4	41.8	4,438.9
Yucatán	130.4	6.0	86.7	65.1	1,125.9	2.0	35.5	307.4	39.9	1,798.9
Zacatecas	11,609.2	456.9	5,349.0	3,050.1	1,493.1	332.2	1,035.4	1,163.2	256.0	24,745.1
Total nacional	87,520.9	16,076.8	158,676.6	280,938.5	19,382.9	2,809.9	27,949.1	65,848.7	24,047.6	683,251.0

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b Unidades de producción de maíz que reportaron el uso conjunto de métodos de riego por gravedad y por bombeo (presurizado).

Tabla III.6. Superficie sembrada estimada por sistema de producción de maíz con riego y entidad federativa para el ciclo de producción otoño - invierno. Cifras en [ha].

Estado de la República	Sistema de producción ^a									Total estatal
	GCS	GMS	GCF	GMF	BCS	BMS	BCF	BMF	Otro ^b	
Aguascalientes	36.7	4.3	56.6	47.3	16.0	0.7	2.9	92.1	4.4	261.0
Baja California	-	-	-	5.3	5.0	-	-	-	-	10.3
Baja California Sur	80.3	6.5	1.0	24.2	99.0	10.5	127.9	162.3	2.5	514.2
Campeche	0.0	6.3	-	1.2	0.5	-	2.2	5.2	-	15.4
Coahuila	131.9	56.1	18.0	103.3	0.7	-	-	-	-	310.0
Colima	59.7	1.7	52.2	141.8	17.2	5.0	12.0	6.0	1.0	296.6
Chiapas	176.5	0.5	97.4	565.0	15.2	-	25.1	145.7	-	1,025.4
Chihuahua	144.3	48.4	120.3	416.0	102.5	-	204.4	446.0	76.4	1,558.3
Distrito Federal	-	-	-	-	0.1	-	3.5	-	-	3.6
Durango	403.2	12.5	108.1	142.1	11.4	-	4.9	8.5	250.6	941.3
Guanajuato	129.2	109.0	424.0	3,401.6	22.0	-	179.7	1,764.1	209.8	6,239.4
Guerrero	196.8	0.6	268.7	475.7	151.9	0.5	38.4	32.6	21.9	1,187.1
Hidalgo	401.8	93.3	314.8	596.6	20.7	7.0	14.1	31.0	175.8	1,655.1
Jalisco	54.8	15.5	569.4	913.3	71.2	51.1	204.2	212.6	124.8	2,216.9
México	175.9	23.2	648.1	118.5	15.5	-	24.5	6.0	1.1	1,012.8
Michoacán	157.3	28.2	1,570.9	1,230.9	57.3	-	182.8	120.9	248.7	3,597.0
Morelos	18.0	2.5	115.3	263.9	0.2	-	1.6	14.5	13.5	429.5
Nayarit	71.8	-	103.0	803.6	183.1	15.4	330.7	1,021.8	578.0	3,107.4
Nuevo León	144.3	26.4	386.4	1.1	63.4	2.0	1.0	-	2.0	626.6
Oaxaca	469.4	18.9	1,493.8	75.8	109.3	7.0	150.4	22.6	35.5	2,382.7
Puebla	650.9	46.7	2,453.5	292.8	6.9	2.6	48.4	22.5	12.1	3,536.4
Querétaro	547.6	15.0	338.1	223.8	35.4	3.7	41.4	174.0	93.9	1,472.9
Quintana Roo	7.0	-	2.2	25.8	2.8	-	8.0	15.5	-	61.3
San Luis Potosí	252.6	125.1	210.9	443.9	33.5	3.8	138.8	152.8	141.4	1,502.8
Sinaloa	1,255.4	976.5	9,788.3	175,307.9	63.6	230.0	137.6	851.0	2,356.4	190,966.7
Sonora	79.5	26.6	268.4	2,951.8	22.1	2.6	6.0	-	5.0	3,362.0
Tabasco	1.7	-	-	-	4.3	-	-	0.2	-	6.2
Tamaulipas	375.5	258.7	243.9	1,836.5	-	-	-	163.1	83.8	2,961.5
Tlaxcala	4.6	-	26.4	7.5	1.0	-	7.6	9.0	-	56.1
Veracruz	67.5	35.2	78.2	33.8	68.4	6.8	0.8	6.6	0.1	297.4
Yucatán	13.7	-	1.8	4.2	65.8	-	-	4.9	4.6	95.0
Zacatecas	121.5	36.3	133.9	108.7	21.7	7.2	59.0	26.3	7.4	522.0
Total nacional	6,229.4	1,973.9	19,893.2	190,563.8	1,287.8	355.9	1,957.9	5,517.9	4,450.8	232,230.6

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b Unidades de producción de maíz que reportaron el uso conjunto de métodos de riego por gravedad y por bombeo (presurizado).

Tabla III.7. Uso relativo estimado a nivel nacional de canales recubiertos y canales de tierra en la superficie sembrada bajo los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad. Cifras en [%].

Sistema de producción ^a	Ciclo PV ^b		Ciclo OI ^c	
	Canales recubiertos	Canales de tierra	Canales recubiertos	Canales de tierra
GCS	26.4	73.6	17.5	82.5
GMS	23.8	76.2	9.6	90.4
GCF	30.9	69.1	15.0	85.0
GMF	18.8	81.2	8.4	91.6

^a G, riego por gravedad; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b Primavera – verano. ^c Otoño – invierno.

Con respecto a los sistemas de producción de maíz con riego presurizado, la categoría *otro método de riego* concentró la mayor proporción de la superficie, con cerca de 30% - 50% de la superficie total estimada bajo estos sistemas de producción para el ciclo PV y 40% - 70% de aquella para el ciclo OI, seguido del riego por aspersión, con 40% - 45% y 25% – 35%, respectivamente (**Tabla III.8**). El dominio de la categoría *otro método de riego* podría explicarse por la diversidad de respuestas de los participantes en el Censo que fueron agrupadas en dicha categoría. En el presente estudio, *otro método de riego* se asumió como un método de riego presurizado, pues los microdatos del Censo no proporcionan detalles suficientes para su correcta desagregación. De ahí que es probable que se haya sobreestimado el uso relativo de los métodos de riego presurizado. El uso considerable de riego por aspersión podría deberse tanto a su costo relativamente accesible, comparado con los sistemas de riego localizado (Phocaides, 2000), como a su idoneidad técnica para el riego de cultivos como el maíz (Ojeda y Herrera, 2000).

Tabla III.8. Uso relativo estimado a nivel nacional de los métodos de riego presurizado en la superficie sembrada bajo los sistemas de producción de maíz con riego por bombeo. Cifras en [%].

Sistema de producción ^a	Ciclo PV ^b				Ciclo OI ^c			
	Aspersión	Micro-aspersión	Riego por goteo	Otro método	Aspersión	Micro-aspersión	Riego por goteo	Otro método
BCS	38.6	3.8	13.9	43.8	34.2	5.1	21.4	39.3
BMS	45.5	5.3	16.7	32.5	25.0	1.1	5.3	68.6
BCF	38.7	5.4	8.6	47.3	28.1	4.0	13.9	53.9
BMF	37.6	2.5	7.9	52.0	31.4	2.2	10.6	55.8

^a B, riego por bombeo (presurizado); C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b Primavera – verano. ^c Otoño – invierno.

La fuente principal de agua de riego para los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad serían las presas, pues se calculó que de éstas se abastece alrededor de 40% - 70% de la superficie sembrada total estimada bajo estos sistemas de producción para el ciclo PV y 40% - 90% de aquella para el ciclo OI (**Tabla III.9**). Estos resultados eran previsibles puesto que la mayoría de la superficie bajo riego por gravedad en el país se localiza en los grandes distritos de riego, los cuales obtienen el agua de riego fundamentalmente de presas (Pedroza y Hinojosa, 2014). En contraste, los sistemas de producción de maíz con riego presurizado utilizarían mayoritariamente agua de pozo profundo, pues se determinó que alrededor de 60% - 80% y 30% - 50% de la superficie sembrada total bajo estos sistemas de producción en los ciclos PV y OI, respectivamente, depende de dicha fuente de agua. El uso intensivo de agua de pozo profundo en los sistemas de producción de maíz con riego

presurizado podría deberse en parte por la confiabilidad y flexibilidad de esta fuente de agua (Caswell y Zilberman, 1985; Siebert et al., 2010), que ayuda a la correcta operación de los sistemas de riego modernos.

Tabla III.9. Uso relativo estimado a nivel nacional de las fuentes de agua para riego por sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción. Cifras en [%].

Sistema de producción ^a	Ciclo PV ^b					Ciclo OI ^c				
	Presa	Río	Pozo profundo	PE [m] ^d	Otra fuente ^e	Presa	Río	Pozo profundo	PE [m]	Otra fuente
GCS	35.8	22.0	25.3	94.1	16.9	39.0	20.1	15.9	90.6	25.0
GMS	56.6	14.0	17.0	88.4	12.3	69.4	17.0	8.2	104.1	5.5
GCF	47.2	16.7	20.1	96.8	16.0	59.4	14.2	13.0	105.2	13.4
GMF	67.8	11.5	16.4	100.8	4.3	92.9	4.2	2.0	114.6	0.8
BCS	3.2	14.9	58.3	86.2	23.6	4.5	23.3	50.0	64.1	21.5
BMS	9.9	9.2	73.3	83.8	7.6	54.8	11.2	29.7	60.2	4.3
BCF	7.4	9.6	71.7	110.9	11.3	5.1	25.1	50.0	119.2	19.8
BMF	11.3	6.1	78.5	89.5	4.2	20.2	23.6	49.1	88.6	7.1

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b Primavera – verano. ^c Otoño – invierno. ^d PE, Profundidad de extracción promedio. ^e Incluye bordo de agua, pozo a cielo abierto, manantial, y otra fuente.

Otro factor que podría explicar esta situación es la disponibilidad de electricidad a bajo costo gracias al subsidio a las tarifas eléctricas para bombeo agrícola (Kumar et al., 2013; Scott y Shah, 2004), las cuales en México son menos de la mitad de las tarifas ordinarias (Sheinbaum et al., 2010). En general, según las cifras calculadas, las fuentes de agua superficial proveerían la mayor parte del agua para el riego del maíz. En el ciclo de producción PV, se determinó que cerca de 48% del total de la superficie de maíz de riego es regada con agua de presas, el 29% con agua de pozo profundo, el 14% con agua de ríos, y el 10% con agua de otras fuentes. En el ciclo OI, aproximadamente 85% de la superficie es regada con agua de presas, el 6% con agua de ríos, el 5% con agua de pozo profundo, y el 3% con agua de otras fuentes.

La mayoría de los sistemas de producción de maíz con riego usarían agua fresca para regar las plantas de maíz (**Tabla III.10**), aunque el uso de aguas residuales sería relevante en los sistemas de producción GMS y GCS, en los cuales 10% - 40% de su superficie sembrada total sería regada por este tipo de agua, principalmente en los estados del centro del país (e.g. Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México). Este resultado parece razonable dado que el uso directo de aguas residuales para el riego agrícola en el país se concentra en el estado de Hidalgo, con aguas residuales de la Ciudad de México (AQUASTAT, 2016). Puesto que, según las estimaciones, el uso de aguas residuales y agua tratada en el cultivo de maíz de riego es en general bajo, la presión creciente sobre los recursos de agua fresca podría atenuarse en alguna medida empleando estas fuentes alternativas de agua para riego. Sin embargo, el uso seguro de aguas residuales en el riego agrícola podría precisar algún tipo de tratamiento previo, y por lo tanto costos económicos y ambientales adicionales.

III.3.3 Requerimientos de agua para riego

Para el ciclo de producción PV, la ET_c promedio a nivel estatal se estimó en el rango de aproximadamente 366 – 538 mm, con un promedio ($\pm$ desviación estándar) a nivel nacional de 423 ± 44 mm. De manera análoga, la P_{ef} se calculó en el rango de 37 – 653 mm, con un promedio de 366 ± 140 mm; los NI_{req} se determinaron en el intervalo de 5 – 500 mm, con un promedio de 144 ± 118 mm (**Tabla III.11**). En general, los NI_{req} estimados fueron mayores en los estados del norte del país, donde predominan los climas áridos y semi-áridos con lluvias escasas.

Tabla III.10. Uso relativo estimado a nivel nacional de los tipos de agua para riego por sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción. Cifras en [%].

Sistema de producción ^a	Ciclo PV ^b				Ciclo OI ^c			
	Agua blanca	Agua negra	Agua tratada	Otro tipo	Agua blanca	Agua negra	Agua tratada	Otro tipo
GCS	81.9	13.5	1.9	2.7	91.6	7.0	0.4	1.0
GMS	57.9	39.4	2.1	0.6	88.7	10.7	0.4	0.2
GCF	88.6	7.8	0.9	2.7	93.9	3.2	2.0	0.9
GMF	90.1	8.2	0.9	0.8	99.0	0.4	<0.1	0.5
BCS	94.2	1.8	0.7	3.2	93.1	2.2	3.7	1.0
BMS	92.2	6.6	0.6	0.6	90.8	3.2	0.3	5.6
BCF	96.6	1.2	0.5	1.7	98.6	0.6	0.2	0.7
BMF	96.5	2.3	0.3	0.9	96.4	1.9	0.4	1.3

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b Primavera – verano. ^c Otoño – invierno.

Esta observación es relevante puesto que se estimó que más de 40% de la superficie sembrada total de maíz bajo riego se concentra en esa región del país. Para el ciclo de producción OI, la ET_c promedio a nivel estatal se calculó en el rango de 354 – 559 mm, con un promedio de 450 ± 56 mm; la P_{ef} en el rango de 6 – 227 mm con un promedio de 75 ± 67 mm; y los NI_{req} en el intervalo de 202 – 554 mm, con un promedio de 386 ± 96 mm. Los valores superiores de los NI_{req} calculados para el ciclo OI probablemente son resultado de una P_{ef} inferior, pues este ciclo de producción coincide con la temporada de sequía en México (septiembre a mayo). El rango amplio de los NI_{req} aquí estimados podría atribuirse principalmente a las diferencias en regímenes climáticos y de precipitaciones a lo largo y ancho del territorio nacional. Nótese que el estimado de ET_c es próximo al límite inferior del rango típico reportado para el maíz grano (500 – 800 mm) (Steduto et al., 2012).

III.3.4 Uso de energía para riego y emisiones de GEI asociadas

III.3.4.1 Sistemas de producción de maíz con riego por gravedad

Para los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad, los promedios nacionales ponderados (por superficie sembrada) de los I_{bruto} y la I se estimaron en 370 – 480 mm y 210 – 250 mm, respectivamente, para el ciclo de producción PV, y en 1,040 – 1,070 mm y 520 – 580 mm para el ciclo OI (**Tabla III.12**). Estos rangos relativamente estrechos podrían explicarse por la concentración de la superficie sembrada de maíz bajo riego en un grupo reducido de entidades del norte y centro del país.

Tabla III.11. Evapotranspiración del maíz (ET_c), precipitación efectiva (P_{ef}) y requerimientos netos de agua de riego (NI_{req}) promedio estimados a nivel estatal por estado de la República y ciclo de producción. Cifras en [mm].

Estado de la República	No. de estaciones ^a	Periodo ^b	Ciclo PV ^c						Ciclo OI ^d					
			ET_c		P_{ef}		NI_{req}		ET_c		P_{ef}		NI_{req}	
			Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE
Aguascalientes	11	2006-2007	400.1	30.9	289.2	53.0	156.4	44.8	442.3	43.1	29.8	7.4	412.5	46.4
Baja California Sur	2	2008-2009	537.5	20.5	37.0	13.6	500.8	6.9	449.6	21.9	7.5	3.3	442.3	18.9
Campeche	6	2007-2008	422.1	25.1	524.8	40.4	13.1	10.5	437.2	26.0	128.6	28.2	307.8	50.3
Chihuahua	11	2009-2010	487.5	67.6	184.5	107.0	336.4	122.9	487.4	134.7	28.3	25.0	460.1	147.8
Chiapas	8	2008-2009	382.0	28.4	653.2	110.8	6.8	10.4	429.8	29.7	149.5	102.6	304.6	88.3
Coahuila	16	2006-2007	484.2	50.3	184.4	68.0	321.4	89.6	433.1	60.0	58.7	23.6	375.2	76.5
Colima	4	2006-2007	379.7	42.2	602.6	49.6	4.7	4.2	556.3	67.6	43.8	20.6	512.7	79.4
Durango	15	2007-2008	410.5	15.4	317.1	58.9	150.3	48.9	559.4	72.8	5.8	2.7	553.6	73.6
Guerrero	10	2008-2009	425.4	14.7	422.3	78.4	90.8	51.7	532.6	26.3	7.7	6.8	524.6	27.9
Guanajuato	22	2006-2007	413.3	16.4	367.1	59.5	126.8	43.1	474.8	61.0	37.5	12.9	437.1	63.2
Hidalgo	22	2007-2008	366.4	42.6	298.0	64.2	129.4	74.1	438.5	39.8	69.9	35.6	368.0	60.1
Jalisco	28	2006-2007	393.5	35.6	411.7	86.1	86.5	64.9	468.9	50.5	30.0	14.0	438.7	57.6
Michoacán	10	2007-2008	420.5	40.5	378.6	56.4	118.5	34.6	463.6	16.9	30.4	19.2	436.6	20.1
Morelos	10	2006-2007	384.9	51.4	478.8	55.0	47.7	32.1	480.9	54.5	20.6	16.3	459.7	70.0
Nayarit	16	2007-2008	395.3	23.1	505.2	74.2	55.4	49.3	493.1	80.2	13.7	6.6	479.4	79.9
Nuevo León	8	2006-2007	426.8	45.5	293.6	70.2	174.6	78.7	357.1	32.4	92.8	26.2	271.2	47.8
Oaxaca	9	2009-2010	406.3	28.9	527.8	153.2	56.9	78.9	373.7	10.2	214.2	140.7	211.6	80.5
Puebla	19	2006-2007	398.5	23.9	363.2	92.8	103.9	58.4	499.2	50.2	53.4	21.8	444.7	55.7
Quintana Roo	9	2007-2008	428.1	9.1	423.8	36.4	77.2	24.5	419.4	22.6	197.3	32.4	244.0	37.8
Sinaloa	33	2008-2009	452.4	61.9	278.9	77.3	198.3	65.4	391.0	40.8	77.0	126.3	338.8	93.8
San Luis Potosí	10	2008-2009	430.2	15.7	296.4	129.0	172.8	91.4	489.3	76.5	44.2	25.2	447.5	97.0
Sonora	25	2006-2007	519.3	55.3	133.7	62.4	389.1	100.2	393.8	53.1	29.0	17.3	370.0	58.8
Tabasco	5	2009-2010	369.9	44.1	435.1	116.8	58.7	61.6	397.9	13.5	227.3	112.3	292.7	51.6
Tamaulipas	12	2007-2008	411.9	35.2	323.3	99.3	153.6	78.3	381.0	52.7	52.9	24.6	328.7	66.3
Tlaxcala	12	2006-2007	386.0	31.2	352.1	90.2	93.4	68.7	435.2	35.6	64.6	18.9	369.3	38.0
Veracruz	36	2009-2010	391.4	48.5	516.5	142.4	51.4	81.7	354.2	51.6	189.6	109.0	202.3	76.4
Yucatán	4	2008-2009	484.7	13.2	364.0	32.4	155.1	27.6	443.4	3.7	152.7	52.1	296.2	49.6
Zacatecas	28	2006-2007	439.5	24.9	278.3	64.3	205.5	61.2	522.8	41.5	30.8	7.6	492.0	43.3

^a Número de estaciones agro-meteorológicas de las cuales se recopilieron registros climáticos para las estimaciones del presente análisis. ^b Periodo de los registros climáticos recopilados. ^c PV, primavera - verano. ^d OI, otoño - invierno.

Tabla III.12. Promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) de los requerimientos brutos de agua de riego (*I_{bruto}*) y del agua de riego aplicada (*I*) por hectárea para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción ^b	<i>I_{bruto}</i> [mm]	<i>I</i> [mm]
GCS	PV	406.16	234.32
	OI	1,055.72	582.75
GMS	PV	460.19	246.77
	OI	1,068.21	547.14
GCF	PV	374.72	209.31
	OI	1,040.04	551.11
GMF	PV	481.28	252.14
	OI	1,051.19	521.71
BCS	PV	228.65	191.73
	OI	659.66	520.80
BMS	PV	239.10	197.48
	OI	690.50	489.34
BCF	PV	281.24	237.80
	OI	709.35	558.08
BMF	PV	297.16	249.72
	OI	751.87	564.28

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno.

Los estados de Sinaloa, Guanajuato, México, Michoacán, Tamaulipas, Chihuahua, Jalisco e Hidalgo en conjunto representan casi 80% de la superficie sembrada total de maíz de riego calculada en ambos ciclos de producción. Nótese que las cifras arriba mencionadas son razonablemente consistentes con mediciones directas en campo realizadas en diversas entidades federativas: *I_{bruto}* de 550 mm e *I* de 250 mm para el ciclo de producción PV, y de 730 – 1,270 mm y 430 – 600 mm, respectivamente, para el ciclo OI (Bolaños-González et al., 2001; Inzunza, 2008; Mendoza-Pérez et al., 2016; Ojeda-Bustamante et al., 2006; Peinado et al., 2015; Pérez-Espejo y Hernández-Amezcu, 2016).

Los promedios nacionales ponderados (por superficie sembrada) de *IrrE* e *IrrGEI* para los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad se calcularon en los rangos de 3.0 – 7.1 GJ ha⁻¹ (**Tabla III.13**) y de 197.1 – 462.8 kg CO₂e ha⁻¹ (**Tabla III.14**), respectivamente, para el ciclo de producción PV. Para el ciclo OI, los rangos estimados fueron de 1.0 – 8.9 GJ ha⁻¹ y 62.0 – 578.3 kg CO₂e ha⁻¹. Las *IrrGEI* estimadas consistieron de aproximadamente 96% CO₂, 1% N₂O, y 3% CH₄, resultado que bien podría deberse al uso preferente de electricidad para el bombeo del agua de riego y el uso predominante de combustibles fósiles (sobre todo gas natural) en la generación de electricidad. Dado que tanto el uso de electricidad como las emisiones de GEI estimadas resultaron casi por completo del bombeo de agua de pozo profundo, la variabilidad del *IrrE* y las *IrrGEI* sería a consecuencia de las diferencias en la proporción de agua pozo profundo en los *I_{bruto}* totales calculados para cada sistema de producción de maíz. Los valores más bajos de *IrrE* e *IrrGEI* se obtuvieron para el sistema de producción GMF, pues la mayoría de su superficie sembrada total estimada (alrededor de 40% en ciclo PV y 90% en ciclo OI) se localizó en el estado de Sinaloa, donde el agua de riego de pozo profundo aportaría menos de 1% de los *I_{bruto}* promedio. En contraste, los sistemas de producción GCS y GCF mostraron los valores más elevados de *IrrE* e *IrrGEI* dado que,

según el análisis, dependen en mayor medida del agua extraída de pozo profundo. Estas tendencias son consistentes con cifras reportadas para el maíz regado por surcos utilizando exclusivamente agua de pozo profundo en el estado de Guanajuato ($10.3 - 14.8 \text{ GJ ha}^{-1}$) (Hennecke et al., 2016).

Tabla III.13. Promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) del uso total de energía para riego por hectárea y por unidad de volumen de agua de riego aplicada ($IrrE_s$) para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción ^b	Bombeo PP ^c	Aplicación de riego	Equipo de riego	Mano de obra	Total	$IrrE_s$
				[GJ ha ⁻¹]			[MJ m ⁻³]
GCS	PV	7.12	-	-	2.56×10^{-3}	7.13	2.51
	OI	8.90	-	-	2.56×10^{-3}	8.90	1.22
GMS	PV	3.26	-	-	2.56×10^{-3}	3.26	1.35
	OI	3.89	-	-	2.56×10^{-3}	3.89	0.58
GCF	PV	4.37	-	-	2.56×10^{-3}	4.37	1.97
	OI	6.46	-	-	2.56×10^{-3}	6.47	0.97
GMF	PV	3.03	-	-	2.56×10^{-3}	3.04	1.31
	OI	0.95	-	-	2.56×10^{-3}	0.96	0.15
BCS	PV	9.29	4.67	1.54	1.86×10^{-3}	15.51	7.99
	OI	9.84	12.19	1.86	1.64×10^{-3}	23.90	4.66
BMS	PV	10.96	4.98	1.65	1.57×10^{-3}	17.59	10.56
	OI	5.60	11.38	1.22	2.43×10^{-3}	18.20	3.53
BCF	PV	14.76	5.51	1.41	1.94×10^{-3}	21.69	9.31
	OI	14.57	12.77	1.58	2.05×10^{-3}	28.92	5.12
BMF	PV	15.35	5.91	1.30	2.08×10^{-3}	22.55	8.86
	OI	16.55	13.67	1.40	2.11×10^{-3}	31.61	5.51

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c Pozo profundo.

El promedio nacional simple del uso de energía y las emisiones de GEI por unidad de volumen de agua extraída de pozo profundo se estimó entre $3.5 - 4.7 \text{ MJ m}^{-3}$ y $225.4 - 303.8 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-3}$ (datos no mostrados), respectivamente. La menor variabilidad en estas cifras podría explicarse por valores más o menos uniformes de la profundidad de extracción promedio entre las diferentes entidades federativas. Los promedios ponderados de $IrrE_s$ e $IrrGEI_s$ se estimaron entre $1.3 - 2.5 \text{ MJ m}^{-3}$ (Tabla III.13) y $85.0 - 162.8 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-3}$ (Tabla III.14), respectivamente, para el ciclo de producción PV, y entre $0.2 - 1.2 \text{ MJ m}^{-3}$ y $9.5 - 79.3 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-3}$ para el ciclo OI.

III.3.4.2 Sistemas de producción de maíz con riego presurizado

Para los sistemas de producción de maíz con riego presurizado, los promedios ponderados a nivel nacional de los I_{bruto} y la I se estimaron en los intervalos de $230 - 300 \text{ mm}$ y $190 - 250 \text{ mm}$, respectivamente, para el ciclo de producción PV, y de $660 - 750 \text{ mm}$ y $490 - 560 \text{ mm}$ para el ciclo OI (Tabla III.12). Los últimos valores son consistentes con los reportados para el cultivo de maíz con riego presurizado en el ciclo OI en varias localidades del país: I_{bruto} de $490 - 820 \text{ mm}$ e I de $250 - 500 \text{ mm}$ (Ojeda-Bustamante et al., 2006; Ortiz et al., 2009; Zamora et al., 2007).

Tabla III.14. Promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) de las emisiones de GEI totales asociadas al uso de energía para riego por hectárea y por unidad de volumen de agua de riego aplicada (*IrrGEI_s*) para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción ^b	Bombeo PP ^c	Aplicación de riego	Equipo de riego	Total	<i>IrrGEI_s</i>
		[kg CO ₂ e ha ⁻¹]			[g CO ₂ e m ⁻³]	
GCS	PV	462.79	-	-	462.79	162.77
	OI	578.31	-	-	578.31	79.28
GMS	PV	211.70	-	-	211.70	87.72
	OI	252.90	-	-	252.90	37.55
GCF	PV	283.67	-	-	283.67	128.11
	OI	419.94	-	-	419.94	63.02
GMF	PV	197.13	-	-	197.13	85.00
	OI	62.02	-	-	62.02	9.54
BCS	PV	603.91	303.71	50.63	958.25	465.49
	OI	639.34	792.33	45.14	1,476.81	287.08
BMS	PV	712.31	323.48	44.36	1,080.15	526.59
	OI	364.13	739.30	63.52	1,166.95	220.37
BCF	PV	959.34	358.44	52.59	1,370.37	555.46
	OI	946.78	829.62	54.50	1,830.91	323.87
BMF	PV	997.07	383.85	55.97	1,436.88	547.14
	OI	1,075.45	888.19	56.29	2,019.92	351.47

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c Pozo profundo.

Comparado con los estimados para sus contrapartes bajo riego por gravedad, los *I_{bruto}* promedio son aproximadamente 25% - 50% menores, lo cual podría deberse en buena medida a la disminución en las pérdidas de conducción y distribución del agua de riego. De igual manera, en la mayoría de los casos la *I* promedio es menor (hasta por 20%) que la correspondiente a la de los sistemas de riego por gravedad, muy probablemente a causa de una mejor eficiencia de aplicación en los sistemas con riego presurizado.

Sin embargo, las cifras calculadas sugieren que los sistemas de producción de maíz con riego presurizado requieren más energía y por tanto generan más emisiones de GEI por unidad de superficie sembrada. Los promedios ponderados (por superficie sembrada) a escala nacional del *IrrE* y las *IrrGEI* se determinaron en los rangos de 15.5 – 22.6 GJ ha⁻¹ (**Tabla III.13**) y 958.3 – 1,436.9 kg CO₂e ha⁻¹ (**Tabla III.14**), respectivamente, para el ciclo de producción PV, y de 18.2 – 31.6 GJ ha⁻¹ y 1,167.0 – 2,019.9 kg CO₂e ha⁻¹ para el ciclo OI. Estos valores son 2 – 30 veces mayores a los calculados para los sistemas de producción con riego por gravedad, lo que podría explicarse por el uso intensivo de agua de pozo profundo y el bombeo adicional para la aplicación del agua de riego en los sistemas de producción con riego presurizado. De los *IrrE* e *IrrGEI* promedio estimados para estos sistemas de producción de maíz, la extracción del agua de pozo profundo acaparó el 60% - 70% de los valores para el ciclo PV y el 30% - 50% de aquellos para el ciclo OI, mientras que la aplicación del agua de riego representó el 25% - 30% y 40% - 60%, respectivamente. La composición de las *IrrGEI* promedio (96% CO₂, 1% N₂O, y 3% CH₄) también podría relacionarse con el uso mayoritario de electricidad para accionar los sistemas de bombeo y riego.

El uso de energía y las emisiones de GEI por unidad de volumen de agua extraída de pozo profundo computadas para los sistemas de producción de maíz con riego presurizado ($2.7 - 4.8 \text{ MJ m}^{-3}$ y $177.5 - 310.3 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-3}$, datos no mostrados) son comparables a los calculados para los sistemas de producción con riego por gravedad, muy probablemente porque las profundidades de extracción resultaron similares. Puesto que el riego por aspersión fue el método de riego dominante en todos los sistemas de producción de maíz con riego presurizado, el uso de energía y las emisiones de GEI por unidad de volumen de agua de riego aplicada variaron moderadamente entre estos sistemas de producción (promedio nacional ponderado de $2.3 - 2.6 \text{ MJ m}^{-3}$ y $148.7 - 167.1 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-3}$, datos no mostrados). La fabricación del equipo de riego contribuyó con aproximadamente 6% - 10% y 4% - 5% del $IrrE$ y las $IrrGEI$ promedio, respectivamente, calculados para el ciclo de producción PV y 4% - 8% y 3% - 5% de aquellos para el ciclo OI. El trabajo humano tuvo una participación marginal en el total de los requerimientos de energía (<1%). Los promedios ponderados de $IrrE_s$ e $IrrGEI_s$ se estimaron entre $8.0 - 10.6 \text{ MJ m}^{-3}$ (**Tabla III.13**) y $465.5 - 555.5 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-3}$ (**Tabla III.14**), respectivamente, para el ciclo PV, y entre $3.5 - 5.5 \text{ MJ m}^{-3}$ y $220.4 - 351.5 \text{ g CO}_2\text{e m}^{-3}$ para el ciclo OI.

Un nivel similar de uso de energía para riego se reporta para la producción de maíz grano con riego por aspersión convencional en Turquía (alrededor de 22.9 GJ ha^{-1}), del cual 96% corresponde al uso directo de energía, 3% al uso indirecto, y 1% al trabajo humano (Topak et al., 2009). Un análisis de ciclo de vida de sistemas de riego presurizado abastecidos con agua subterránea, también destaca el papel relevante del uso directo de energía y las emisiones de GEI directas (96% - 98% del uso total de energía y 75% - 90% de las emisiones totales reportadas), la mayoría de los cuales se debe a la aplicación del agua de riego a los campos de cultivo (Acharya et al., 2015). El uso de energía para riego y las emisiones de GEI asociadas promedio en la producción de maíz de alto rendimiento en los EE.UU. (13.9 GJ ha^{-1} y $870.0 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$) son menores a los valores aquí estimados, lo cual podría explicarse en buena medida por una mejor eficiencia de los sistemas de bombeo en las unidades de producción de los EE.UU. (Grassini y Cassman, 2012). En la producción de maíz con riego presurizado y agua de pozo profundo en la India, los requerimientos de energía para riego ($13.1 - 14.0 \text{ GJ ha}^{-1}$) también son menores a los calculados para la producción en México, aunque las emisiones de GEI ($3,200 - 3,640 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$) son mucho mayores, principalmente debido a un contenido de carbono más alto de la electricidad en la India (Reddy et al., 2015).

III.3.5 Estimados a escala nacional

Los I_{bruto} totales a escala nacional ascendieron a aproximadamente 4.7 km^3 , de los cuales 0.7 km^3 provendrían de pozos profundos, mientras que la I total a escala nacional resultó cercana a 2.6 km^3 (**Tabla III.15**). A modo de comparación, el uso consuntivo de agua en las actividades agropecuarias en todo el país en 2007 alcanzó casi 60.6 km^3 , de los cuales 40.5 km^3 fueron extraídos de fuentes de agua superficial y 20.1 km^3 de agua subterránea (CONAGUA, 2008). Considerando estas cifras, la producción de maíz grano de riego utilizaría una fracción modesta del volumen total de agua usado en el sector agropecuario, lo cual parece razonable dado que la gran mayoría de la superficie de maíz en México es de temporal. Los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad en conjunto serían responsables de alrededor de 90% de los I_{bruto} y la I totales a nivel país puesto que estos sistemas de producción abarcaron la mayor parte de la superficie de maíz bajo riego y sus eficiencias de conducción, distribución y aplicación fueron bajas, lo que se traduce en pérdidas sustantivas de agua. Los sistemas de producción de maíz con riego presurizado fueron responsables del 10% restante de los I_{bruto} y la I totales a nivel nacional, pero se adjudicaron el 40% del total de

agua extraída de pozo profundo (en base a los I_{bruto}), pues los resultados sugieren que estos sistemas de producción dependen en alto grado de esta fuente de agua.

Tabla III.15. Requerimientos brutos de agua para riego (I_{bruto}) y volumen de agua de riego aplicada (I) estimados a nivel nacional para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción ^b	I_{bruto} [hm ³]		I [hm ³]
		Total	Extraída de pozo profundo	
GCS	PV	307.82	91.29	177.59
	OI	58.13	10.91	32.09
GMS	PV	68.71	9.37	36.84
	OI	20.68	1.57	10.59
GCF	PV	381.69	78.52	213.21
	OI	196.64	25.74	104.20
GMF	PV	1,309.47	171.12	686.01
	OI	1,999.54	41.64	992.38
BCS	PV	40.95	27.14	34.34
	OI	8.13	3.64	6.42
BMS	PV	5.95	4.40	4.91
	OI	2.43	0.70	1.72
BCF	PV	72.03	58.58	60.90
	OI	13.40	6.20	10.54
BMF	PV	185.30	154.08	155.72
	OI	40.13	17.69	30.12
Total nacional		4,710.97	702.57	2,557.57

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno.

El $IrrE$ a escala nacional fue de aproximadamente 4.8 PJ y las $IrrGEI$ de 305.2 Gg CO₂e. De éstos, cerca de 81% y 82%, respectivamente, serían a consecuencia de la extracción de agua de pozo profundo, 15% y 16% de la aplicación del agua de riego a las parcelas, y 3% y 2% de la fabricación del equipo de riego (**Tabla III.16**). Del uso directo total de energía, es decir, la energía usada para la extracción de agua de pozo profundo y aplicación de agua de riego estimada, la electricidad representó cerca de 96% (4.4 PJ) y el diésel 4% (0.2 PJ). Si se omite el uso de energía *aguas arriba* en la generación de electricidad, el uso total estimado de electricidad ascendería a alrededor de 0.5 TWh, esto es, aproximadamente 6% del uso de electricidad para bombeo agrícola en 2007 en todo el país (7.8 TWh) (SIE, 2017b).

De igual manera, las emisiones de GEI relacionadas con el uso directo de energía para riego del maíz grano aquí estimadas equivalen a cerca de 2% de las emisiones de GEI por el uso de energía en todo el sector agrícola en México en 2006 (12,260.0 Gg CO₂e) (INE-SEMARNAT, 2009). Estos porcentajes pequeños concuerdan con el uso predominante de fuentes de agua superficial y métodos de riego por gravedad en la superficie de maíz bajo riego en el país que en conjunto reducen el uso de energía para riego y las emisiones de GEI asociadas.

En base a las cifras obtenidas, los sistemas de producción de maíz con riego presurizado resultaron más intensivos en uso de energía y emisiones de GEI por unidad de superficie sembrada que sus

contrapartes con riego por gravedad. Por esta razón, el *IrrE* y las *IrrGEI* calculadas a nivel país se dividieron casi equitativamente entre los sistemas de producción con riego por gravedad y con riego presurizado, pese a la gran diferencia en términos de superficie sembrada. En consecuencia, el sistema de producción BMF concentró la mayor parte del uso de energía para riego y las emisiones de GEI totales a nivel nacional (casi 33%), seguido del sistema de producción GMF (21%), el sistema de producción BCF (13%), y el sistema de producción GCS (12%).

Tabla III.16. Uso de energía y emisiones de gases de efecto invernadero asociadas estimados a nivel nacional para cada sistema de producción de maíz con riego y ciclo de producción.

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción ^b	Uso de energía [TJ]					Emisiones de GEI [Gg CO ₂ e]			
		PP ^c	Apl. de riego	Eq. de riego	Mano de obra	Total	PP ^c	Apl. de riego	Eq. de riego	Total
GCS	PV	539.80	-	-	0.19	540.00	35.07	-	-	35.07
	OI	49.00	-	-	0.01	49.02	3.18	-	-	3.18
GMS	PV	48.64	-	-	0.04	48.68	3.16	-	-	3.16
	OI	7.53	-	-	0.01	7.54	0.49	-	-	0.49
GCF	PV	444.70	-	-	0.26	444.96	28.89	-	-	28.89
	OI	122.20	-	-	0.05	122.25	7.94	-	-	7.94
GMF	PV	825.46	-	-	0.70	826.16	53.64	-	-	53.64
	OI	181.56	-	-	0.49	182.05	11.80	-	-	11.80
BCS	PV	166.45	83.71	27.65	0.03	277.84	10.82	5.44	0.91	17.16
	OI	12.12	15.02	2.29	0.01	29.44	0.79	0.98	0.06	1.82
BMS	PV	27.26	12.38	4.10	0.01	43.74	1.77	0.80	0.11	2.69
	OI	1.97	4.01	0.43	0.01	6.41	0.13	0.26	0.02	0.41
BCF	PV	378.15	141.18	36.14	0.05	555.51	24.57	9.18	1.35	35.10
	OI	27.52	24.11	2.98	0.01	54.61	1.79	1.57	0.10	3.46
BMF	PV	956.90	368.38	80.93	0.13	1,406.33	62.17	23.94	3.49	89.60
	OI	88.35	72.97	7.46	0.01	168.79	5.74	4.74	0.30	10.78
Total nacional		3,877.63	721.76	161.98	1.98	4,763.34	251.95	46.90	6.33	305.19

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c Pozo profundo.

Los valores promedio de la *PAR* se calcularon en el rango de 0.3 – 3.3 kg grano m⁻³ (Tabla III.17). Este intervalo amplio podría explicarse por la variación en los rendimientos por hectárea y la *I* entre sistemas de producción de maíz y entidades federativas, lo cual a su vez podría atribuirse a diferencias en las prácticas de manejo y condiciones agro-climáticas. Los valores más altos de la *PAR* se computaron para los sistemas de producción GMF y BMF en el ciclo de producción PV, muy probablemente a consecuencia de la combinación de altos rendimientos y baja *I* por una mayor contribución de la *P_{ef}*. Estos mismos sistemas de producción de maíz también registran altos rendimientos de producción en el ciclo OI, pero a expensas de una *I* mucho mayor por una reducida contribución de la *P_{ef}* lo que disminuye la *PAR*. Nótese que la *PAR* es más sensible a los cambios en el volumen de agua de riego aplicada que a cambios en los rendimientos del cultivo (Rodrigues et al., 2010). Valores reportados de la *PAR* en la producción de maíz con riego por gravedad (0.8 – 2.3 kg grano m⁻³) (Inzunza, 2008; Mendoza-Pérez et al., 2016) y presurizado (1.9 – 3.0 kg grano m⁻³) (Ortiz et al., 2009; Zamora et al., 2007) caen dentro del rango aquí computado.

Tabla III.17. Productividad del agua de riego (*PAR*) estimada de los sistemas de producción de maíz con riego cuya información sobre rendimiento de producción estuvo disponible en (SIAP, 2008).

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción ^b	No. de entidades federativas ^c	Rendimiento [Mg grano ha ⁻¹]		PAR [kg grano m ⁻³]	
			Rango	Promedio ^d	Rango	Promedio ^d
GCS	PV	2	2.00 – 3.00	2.50	1.13 – 1.45	1.29
GMS	PV	1	-	1.50	-	0.29
	OI	1	-	3.00	-	0.60
GCF	PV	3	2.80 – 4.85	3.88	1.51 – 2.70	2.08
	OI	1	-	3.00	-	0.38
GMF	PV	8	5.38 – 8.08	6.72	1.59 – 5.34	3.25
	OI	7	3.33 – 9.15	5.35	0.50 – 1.78	0.95
BCF	PV	2	3.50 – 4.85	4.18	2.70 – 3.09	2.89
BMF	PV	6	4.00 – 9.00	6.78	1.90 – 5.27	3.26
	OI	3	4.00 – 6.28	4.93	0.57 – 1.07	0.90

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin fertilizantes sintéticos; F, con fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c Número de entidades federativas con información disponible sobre rendimientos de producción. ^d Promedio simple.

Téngase en cuenta que los rendimientos de producción son afectados por muchos otros factores además de riego, incluidos la dosis de fertilizantes, pesticidas, y otros insumos agrícolas, las prácticas de manejo, las condiciones climáticas, y la variedad del cultivo. Además, los sistemas intensivos de producción de maíz con riego generalmente logran mayores eficiencias en el uso de los insumos agrícolas, lo que se traduce en rendimientos más altos y cargas ambientales menores por unidad de grano producido (Grassini y Cassman, 2012). Las cifras aquí obtenidas están en sintonía con estas aseveraciones, pues los sistemas de producción de maíz con aplicación de fertilizantes y uso de semilla mejorada (i.e. sistemas de producción GMF y BMF) mostraron los valores más altos de rendimiento de grano y de la *PAR*.

III.3.6 Análisis de sensibilidad

Los datos del sistema de producción GMF en el estado de Guanajuato en el ciclo PV se usaron para realizar el análisis de sensibilidad de los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad. Para el análisis correspondiente de los sistemas de producción con riego presurizado se emplearon los datos del sistema de producción BMF en el estado de San Luis Potosí en el ciclo PV. Este conjunto de datos se seleccionó a modo de facilitar los cálculos. Sin embargo, nótese que el análisis de sensibilidad sólo se enfoca en los cambios relativos en *IrrE* e *IrrGEI*, de manera que la elección de los datos de uno u otro estado no afecta los resultados del análisis.

Respecto a los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad, el *IrrE* y las *IrrGEI* fueron más sensibles a los cambios en la eficiencia global del sistema de bombeo y en los NI_{req} (**Figura III.1**). Puesto que el uso de energía y las emisiones de GEI asociados a los NI_{req} en estos sistemas de producción estuvieron determinados principalmente por el nivel de uso de agua de pozo profundo, cambios en los valores de la profundidad de extracción y en la participación relativa del agua de pozo profundo en los I_{bruto} tendrían un efecto similar al de los cambios en los NI_{req} . En el caso de los sistemas de producción con riego presurizado, el *IrrE* y las *IrrGEI* fueron más sensibles a los cambios en la eficiencia global del sistema de bombeo, seguido de los cambios en los NI_{req} y la *I*. Obsérvese

que los cambios en la eficiencia de aplicación del agua de riego tendrían un efecto idéntico al de los cambios en la I .

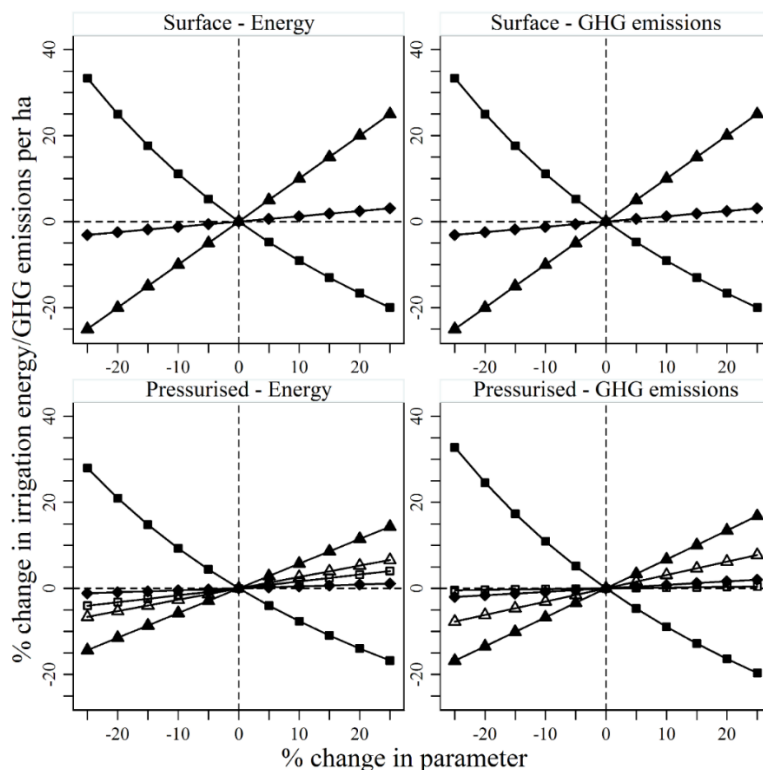


Figura III.1. Análisis de sensibilidad del uso total de energía para riego y las emisiones GEI totales asociadas por ha de: Requerimientos netos de agua de riego ($\blacktriangle$), uso relativo de los métodos de riego ($\blacklozenge$), eficiencia global del sistema de bombeo ($\blacksquare$), volumen de agua de riego aplicado ($\triangle$), y uso de energía y emisiones de GEI asociados a la fabricación del equipo de riego ($\square$) (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018).

La alta sensibilidad a los valores de la eficiencia global del sistema de bombeo también está documentada en estudios previos similares (Tyson et al., 2012). En el presente análisis, el promedio ponderado de la eficiencia global del sistema de bombeo fue aproximadamente 50%, valor cercano al límite inferior de la eficiencia electromecánica para bombas no sumergibles (52% - 64%) fijado por la Norma Oficial Mexicana NOM-006-ENER-2015. No obstante, eficiencias globales tan bajas como 40% han sido registradas en algunos estados del país (Cruz y Levine, 1998; Román-López et al., 2011). Este último valor (i.e. 40%) es casi 20% inferior al aquí asumido, e implicaría un incremento de alrededor de 20% - 25% en el $IrrE$ y las $IrrGEI$ aquí computados para los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad y con riego presurizado.

III.3.7 Implicaciones de política pública

La superficie sembrada de maíz bajo riego en México emplea en mayor medida fuentes de agua superficial y métodos de riego por gravedad. Si bien esta condición reduce los costos energético y de emisiones de GEI del suministro del riego en los sistemas de producción que utilizan riego por gravedad, también implica grandes pérdidas de agua debido a pobres eficiencias de conducción, distribución, y aplicación. Entonces, los programas gubernamentales orientados a la rehabilitación

y modernización de la infraestructura y equipo de riego podrían ampliarse para incluir la prestación de servicios de extensión sobre prácticas de riego eficientes a nivel parcelario. Por ejemplo, está documentado que se pueden lograr incrementos significativos en la eficiencia de uso del agua de riego mediante un diseño apropiado de los sistemas de riego por gravedad, a un costo menor al que supone cambiar a un sistema de riego localizado (Moreno et al., 2010). Sin embargo, en el caso de la superficie de maíz bajo riego por gravedad abastecida con agua de pozo profundo (i.e. aproximadamente 19% y 3% de la superficie total correspondiente estimada para los ciclos de producción PV y OI, respectivamente), podría ser conveniente migrar a métodos de riego presurizado, pues sus altas eficiencias de uso de agua de riego podrían disminuir significativamente la extracción de agua de pozo profundo y con ello el uso de energía para bombeo (Jackson et al., 2010).

No obstante, el elevado costo de inversión y los costos adicionales de operación de los sistemas de riego presurizado podrían dificultar su adopción por parte de los productores pequeños y mediados que siembran cultivos de bajo valor económico, como el maíz. Asimismo, se requerirían acciones adicionales para prevenir que los productores incrementen la extracción de agua y la superficie sembrada con riego, como frecuentemente sucede, para acelerar la recuperación de la inversión, cancelando así los ahorros esperados en el uso de agua (Marañón y López, 2014; Scott y Shah, 2004).

Según el presente estudio, los sistemas de producción de maíz con riego presurizado se abastecen principalmente de agua de pozo profundo (i.e. aproximadamente 73% y 49% de la superficie total correspondiente calculada para los ciclos PV y OI, respectivamente). A la fecha, no obstante, estos sistemas de producción representan una fracción pequeña de la superficie total irrigada de maíz en el país. Los resultados sugieren que el uso de energía y las emisiones de GEI asociadas al riego del maíz se deben principalmente a la extracción de agua de pozo profundo. En consecuencia, las políticas públicas encaminadas a fortalecer la sustentabilidad de los sistemas de producción de maíz bajo riego deberían poner especial atención en el manejo adecuado de los acuíferos. Es probable que la extracción de agua de pozo profundo para riego agrícola se intensifique en los próximos años a causa de los efectos adversos del cambio climático en los niveles de precipitación y la temperatura del aire (Scott, 2013) que acarrearían mayor incertidumbre en la disponibilidad de agua superficial y mayores requerimientos de agua de los cultivos.

Por esa razón, el manejo sustentable de los acuíferos debería ser un asunto prioritario para la seguridad hídrica y alimentaria del país. En México, los acuíferos sobre-explotados (i.e aquellos donde la tasa de extracción excede a la tasa de recarga) constituyen casi 16% del total de los acuíferos (653) pero aportan alrededor de 55% del volumen total extraído a nivel nacional (SINA, 2018). El uso agropecuario, en particular el riego de cultivos, es la causa primaria de la sobre-utilización de los acuíferos, pues aquél absorbe más de 70% del uso consuntivo total del agua subterránea en México (CONAGUA, 2016). El uso intensivo del agua de pozo profundo para riego agrícola es motivado, al menos en parte, por la existencia de tarifas eléctricas subsidiadas para bombeo agrícola, la falta de control de los volúmenes extraídos, y el bajo o nulo precio del agua de riego (Kumar et al., 2013; Mahmoud, 2001; Marañón y López, 2014; Scott y Shah, 2004).

La extracción excesiva de agua de pozo profundo también contribuye al calentamiento global y al cambio climático, pues la quema de combustibles fósiles para la generación de electricidad para el bombeo arroja a la atmósfera cantidades ingentes de GEI. De ahí que, las políticas hídrica, energética, climática y agrícola deberían incorporar medidas específicas y coordinadas para atender el problema del abatimiento de los acuíferos como una vía para proteger los recursos naturales,

reducir los impactos ambientales de la producción agrícola, e impulsar la productividad y rentabilidad económica de las unidades de producción. La definición de las políticas públicas más apropiadas para alcanzar estos objetivos en el contexto de México, amerita análisis y discusión adicionales.

III.3.8 Limitaciones del estudio

Una limitación importante del presente estudio consiste en que la estimación de la ET_c y los NI_{req} se sustentó en registros climáticos de un periodo corto de tiempo (i.e. dos años) así que los datos podrían estar muy influenciados por la variabilidad interanual de los variables climáticas, desviándose entonces de sus tendencias a largo plazo. Por lo tanto, el uso de registros climáticos para un periodo más largo de tiempo y de mejor calidad podría ayudar a obtener estimados más confiables de la ET_c y los NI_{req} del maíz.

A fin de facilitar los cálculos, en el presente estudio se asumió una sola fecha de siembra y cosecha en cada ciclo de producción. En realidad, las fechas de siembra y cosecha se distribuyen a lo largo de varios meses, dado que en el país se cultivan distintas variedades de maíz bajo muy diversas condiciones agro-climáticas y prácticas agrícolas. Las fechas de siembra y cosecha juegan un papel importante en la definición de la demanda evapotranspirativa de los cultivos, y por tanto en los requerimientos de agua de riego, debido a la variabilidad estacional de la temperatura del aire, la precipitación y otros parámetros climáticos. Entonces, las estimaciones podrían afinarse si se consideraran diferentes fechas de siembra y cosecha, por ejemplo, para cada entidad federativa o al menos para determinadas regiones del país.

Tanto los NI_{req} como la I fueron estimados mediante el programa *CropWat* (FAO, 2010), suponiendo condiciones óptimas de crecimiento (i.e. sin plagas, disponibilidad adecuada de nutrientes y humedad en el suelo, etc.) así como la satisfacción completa de la demanda evapotranspirativa de las plantas de maíz. No obstante, la cantidad real de agua de riego utilizada podría diferir de la aquí calculada debido a factores específicos de cada localidad, incluyendo la disponibilidad de agua y las prácticas de riego, como el sobre-riego ampliamente usado por los productores para mitigar riesgos asociados al uso de semilla mejorada, fertilizantes sintéticos, y otros insumos (Scott y Shah, 2004). Otra limitación importante del presente análisis es el empleo de valores uniformes para variables clave como las eficiencias de conducción, distribución y aplicación del agua de riego y la eficiencia global de los sistemas bombeo.

Es muy probable que los valores de dichas variables difieran de una unidad de producción de maíz a otra, resultando en una gran dispersión de los requerimientos de agua de riego, así como del uso de energía y emisiones de GEI asociados. Sin embargo, esta simplificación fue necesaria dado que los datos con el nivel de detalle apropiado para incorporar en el análisis la variabilidad de aquellos parámetros dentro de y entre las localidades y los sistemas de producción de maíz no estuvieron disponibles. Obsérvese que esta limitación fue en alguna medida compensada con el análisis de sensibilidad, el cual mostró el impacto de eventuales cambios en algunas de las variables clave e identificó a las influyentes. Para estas últimas, se deberían realizar esfuerzos adicionales para recabar datos más confiables y completos.

El presente análisis sólo consideró algunos componentes y operaciones de los sistemas de suministro de riego agrícola, así que los valores reportados de uso de energía para riego y emisiones

de GEI asociadas podrían estar sub-estimados. En particular, la contribución del uso de energía y las emisiones de GEI relativos a la fabricación del equipo y la infraestructura de riego seguramente es mayor a la aquí computada. Por ejemplo, estudios previos sugieren que la perforación de pozos, la construcción de canales de riego, presas de almacenamiento y de la infraestructura y equipo instalados dentro y fuera de los campos de cultivo pueden representar en conjunto cantidades considerables de energía y emisiones de GEI (Acharya et al., 2015; Rodrigues et al., 2010).

No obstante, estos componentes y operaciones fueron excluidos del presente análisis porque se careció de datos confiables y detallados para cuantificar apropiadamente su magnitud. De igual manera, debido a la disponibilidad limitada de información, los valores calculados de la *PAR* podrían no ser representativos de la producción de maíz de riego en el país dado que sólo se contó con datos sobre rendimiento de producción para algunas entidades federativas y sistemas de producción. Se necesita entonces de datos más completos sobre el rendimiento de grano por hectárea sembrada.

III.4 Conclusiones

El uso de energía y las emisiones de GEI asociados a la extracción de agua de pozo profundo, aplicación de agua de riego, y fabricación de equipo de riego fueron estimados para distintos sistemas de producción de maíz con riego por gravedad y riego presurizado en México. Según las cifras estimadas, la extracción de agua de pozo profundo concentra la mayor parte del uso de energía para riego y emisiones de GEI asociadas (más de 80% del total) puesto que todos los sistemas de producción de maíz examinados dependen en diferente grado del agua subterránea para riego. La aplicación del agua de riego absorbe la mayor parte del resto de la energía y emisiones de GEI debido el uso extendido de sistemas de riego por aspersión convencional en la producción de maíz con riego presurizado.

Por unidad de superficie sembrada, los sistemas de producción de maíz con riego presurizado son más intensivos en energía y emisiones de GEI que los sistemas de producción con riego por gravedad a consecuencia de su alta dependencia del agua de pozo profundo y el bombeo adicional para la aplicación del agua de riego a las parcelas. El bajo nivel de uso de energía para riego y de emisiones de GEI de los sistemas de producción con riego por gravedad está aparejado con elevados requerimientos brutos de agua para riego debido a pobres eficiencias de conducción, distribución y aplicación del agua. Si bien se consideraron las principales operaciones de los sistemas de riego desde la perspectiva del uso de energía y emisiones de GEI, las deficiencias de información constituyen una limitación importante que incide en la confiabilidad de los resultados del presente estudio. Trabajos posteriores deberían enfocarse en mejorar la base de datos empleada, especialmente para las variables como la eficiencia global de la planta de bombeo, los requerimientos de agua de riego, y los rendimientos de producción.

Los resultados de este estudio podrían ayudar en la elaboración de políticas públicas que contribuyan a la conservación del agua y la energía, así como al control de los impactos ambientales de la producción de maíz bajo riego. Dado que la extracción de agua de pozo profundo es la principal responsable del uso de energía para riego y las emisiones de GEI asociadas, las intervenciones de política pública deberían enfocarse en promover el manejo sustentable de los acuíferos mediante, por ejemplo, una revisión de los subsidios a las tarifas eléctricas para bombeo agrícola. El presente estudio podría también ser de utilidad en la evaluación de la contribución de las operaciones de

riego al fenómeno del calentamiento global y en la predicción de los efectos potenciales del cambio climático en el nexo agua-alimentos-energía para el cultivo de maíz en México.

III.5 Referencias

- Acharya, S., George, B., Aye, L., Nair, S., Nawarathna, B., Malano, H., 2015. Life cycle energy and greenhouse gas emission analysis of groundwater-based irrigation systems. *Irrig. Drain.* 64(3):408–418.
- Allan, T., Keulertz, M., Woertz, E., 2015. The water-food-energy nexus: An introduction to nexus concepts and some conceptual and operational problems. *Int. J. Water Resour. Dev.* 31(3):301–311.
- AQUASTAT, 2016. Country profile - Mexico. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/MEX/index.stm [Consultado el: 05/09/2017].
- Batty, J.C., Keller, J., 1980. Energy requirements for irrigation, en: Pimentel, D. (Ed.), *Handbook of Energy Utilization in Agriculture*. CRC Press, Boca Raton, FL., pp. 35–44.
- Bolaños-González, M., Palacios-Velez, E., Scott, C., Exebio-García, A., 2001. Estimation of water volume used in an irrigation zone through a satellite image and complementary information. *Agrociencia* 35(6):589–597.
- Canakci, M., Topakci, M., Akinci, I., Ozmerzi, A., 2005. Energy use pattern of some field crops and vegetable production: Case study for Antalya Region, Turkey. *Energy Convers. Manag.* 46(4):655–666.
- Caswell, M., Zilberman, D., 1985. The Choices of Irrigation Technologies in California. *Am. J. Agric. Econ.* 67(2):224–234.
- CFE, 2014. Reporte Anual 2014. Comisión Federal de Electricidad, Ciudad de México. Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/inversionistas/StyleLibrary/asests/pdf/InformeAnual.pdf> [Consultado el: 06/10/2017].
- CONAGUA, 2016. Estadísticas del agua en México 2016. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México. Disponible en: http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf [Consultado el: 10/08/2017].
- CONAGUA, 2015a. Estadísticas agrícolas de las unidades de riego 2013-2014. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México. Disponible en: <http://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAUR2013-2014.pdf> [Consultado el: 12/06/2017].
- CONAGUA, 2015b. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego 2013-2014. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México. Disponible en: <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/147021/ea2013-2014.pdf> [Consultado el: 12/06/2017].
- CONAGUA, 2008. Estadísticas del agua en México 2008. Comisión Nacional del Agua, Ciudad de México. Disponible en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_2008.pdf [Consultado el: 13/06/2017].
- CONUEE-GIZ, 2011. Estudio de sistemas de bombeo agropecuarios en México. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía - Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit, Ciudad de México. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/98321/Informe_bombeo_AgricolaVF.pdf [Consultado el: 09/04/2017].
- Cruz, A., Levine, G., 1998. El uso de las aguas subterráneas en el distrito de riego 017, Región Lagunera, México. *International Water Management Institute, Serie Latinoamericana No. 3*. Disponible en: http://www.iwmi.cgiar.org/Publications/Latin_American_Series/pdf/3.pdf [Consultado el: 03/05/2017].
- FAO, 2010. CROPWAT 8.0. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html [Consultado el: 25/02/2017].
- Grassini, P., Cassman, K.G., 2012. High-yield maize with large net energy yield and small global warming intensity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 109(4):1074–9.
- GREET, 2015. The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model - GREET Model. Argonne National Laboratory. US Department of Energy, Argonne, IL.

- Hartkamp, A.D., De Beurs, K., Stein, A., White, J.W., 1999. Interpolation Techniques for Climate Variables. NRG-GIS Series 99-01. Mexico, D.F.: CIMMYT. Disponible en: http://tarwi.lamolina.edu.pe/~echavarri/tecnicas_interpolacion_var_clima.pdf [Consultado el: 28/02/2017].
- Haswell, M., 1981. Energy for subsistence. The MacMillan Press LTD, London, UK.
- Hennecke, A.M., Mueller-Lindenlauf, M., García, C.A., Fuentes, A., Riegelhaupt, E., Hellweg, S., 2016. Optimizing the water, carbon, and land-use footprint of bioenergy production in Mexico - Six case studies and the nationwide implications. *Biofuels Bioprod. Biorefining* 10(3):222–239.
- INE-SEMARNAT, 2009. México. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164168/Cuarta Comunicaci n Nacional.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164168/Cuarta_Comunicaci_n_Nacional.pdf) [Consultado el: 16/01/2017].
- INECC, 2014. Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Informe Técnico. Informe Final. Proyecto No. F.61157.02.005, Ciudad de México. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014 FE tipos combustibles fosiles.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf) [Consultado el: 08/07/2017].
- INEGI, 2009. Censo agrícola, ganadero y forestal 2007. Tabulados básicos. Ciudad de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/default.aspx?c=17177&s=est> [Consultado el: 09/04/2017].
- INIFAP, 2017. Red de estaciones agrometeorológicas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias., Aguascalientes, México. Disponible en: <http://clima.inifap.gob.mx/lnmysr/Estaciones> [Consultado el: 10/10/2016].
- Inzunza, J.O.L., 2008. Optimización de patrones de cultivo de distritos de riego del noreste de México. *Rev. Chapingo Serie Zonas Áridas* 8(2):157–163.
- IPCC, 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group I: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK - New York, USA. Disponible en: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html [Consultado el: 06/02/2017].
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, Japan. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> [Consultado el: 10/02/2017].
- Jackson, T.M., Khan, S., Hafeez, M., 2010. A comparative analysis of water application and energy consumption at the irrigated field level. *Agric. Water Manag.* 97(10):1477–1485.
- Khan, S., Hanjra, M.A., 2009. Footprints of water and energy inputs in food production - Global perspectives. *Food Policy* 34(2):130–140.
- Kumar, M.D., Scott, C.A., Singh, O.P., 2013. Can India raise agricultural productivity while reducing groundwater and energy use? *Int. J. Water Resour. Dev.* 29(4):557–573.
- Lal, R., 2004. Carbon emission from farm operations. *Environ. Int.* 30(7):981–990.
- Lázaro, P., Saucedo, H., Zataráin, F., 2010. Riego por aspersión y localizado. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua - Fundación Produce Nayarit A.C., Jiutepec, Morelos, Mexico. Disponible en: <http://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/publicaciones-nayarit/FOLLETOS%20Y%20MANUALES/FOLLETOS%20IMTA%202009/folleto%203%20RiegoAspersion.pdf> [Consultado el: 12/03/2018].
- Mahmoud, A.-Z., 2001. Water pricing in irrigated agriculture. *Int. J. Water Resour. Dev.* 17(4):527–538.
- Marañón, B.P., López, D.C., 2014. Comentarios críticos a los programas federales para el uso eficiente del agua de riego en México, en: Pérez, F.C. (Ed.), *Gestión Pública y Social del Agua en México*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., pp. 98–109.
- Mejia, M., Peel, D.S., 2009. White corn and yellow corn production in Mexico: Food versus feed? *Anal. Comments* 25, 1–10.
- Mendoza-Pérez, C., Sifuentes-Ibarra, E., Ojeda-Bustamante, W., Macías-Cervantes, J., 2016. Response of

- surface-irrigated corn to regulated deficit irrigation. *Ing. Agrícola y Biosist.* 8(1):29–40.
- Montañez, R., Warman, A., 1982. El cultivo de maíz en México. Diversidad, limitaciones y alternativas. Seis casos de estudio. Centro de Ecodesarrollo, México, D.F.
- Moreno, J.L.V., Marañón, B.P., López, D.C., 2010. Los acuíferos sobreexplotados: Origen, crisis y gestión social, en: Jiménez, B.C., Torregrosa, M.L.A., Aboites, L.A. (Eds.), *El Agua en México. Cauces y Encauces*. Academia Mexicana de Ciencias, Mexico City, pp. 79–115.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Unland-Weiss, H., 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte del Sinaloa, México. *Agrociencia* 40(1):13–25.
- Ojeda, W., Herrera, J.C., 2000. Uso eficiente del agua y la energía en sistemas de bombeo. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.
- Oktavia, E., Widyawan, Mustika, I.W., 2016. Inverse Distance Weighting and Kriging Spatial Interpolation for Data Center Thermal Monitoring, en: 1st International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE). IEEE, 23-24 Aug. 2016; Yogyakarta, Indonesia, pp. 69–74.
- Ortiz, J.E.E., Valdez, B.G., Padilla, I.V., Felix, P.V., 2009. El sistema de riego por aspersión tipo avance frontal en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) de otoño-invierno, en: *Proceedings of the XII International Congress on Agronomic Sciences*. Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, BC, pp. 282–288.
- Pedroza, E., Hinojosa, G.A., 2014. Manejo y distribución del agua en distritos de riego. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, México.
- Peinado, V.M.G., Peinado, H.J.G., Campista, S.L., Delgado, O.R., 2015. Análisis de la producción agrícola y gestión del agua en módulos de riego del distrito 063 de Sinaloa, México. *Estud. Soc.* 23(46):114–136.
- Peña, E., 2007. Eficiencias del uso del agua en distritos de riego en México. *Gaceta del IMTA* No. 3 (Julio). Disponible en: <https://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g03-07-2007/eficiencias-uso-agua.html> [Consultado el: 05/04/2016].
- Pérez-Espejo, R.H., Hernández-Amezcu, T., 2016. Water footprint of four cereals in irrigation district 011, en: Pérez-Espejo, R.H., Constantino-Toto, R.M., Dávila-Ibáñez, H.R. (Eds.), *Water, Food and Welfare. Water Footprint as a Complementary Approach to Water Management in Mexico*. Springer, Mexico City, pp. 189–198.
- Phocaides, A., 2000. *Technical Handbook on Pressurized Irrigation Techniques*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J.P., García-Casal, M.N., 2014. Global maize production, utilization and consumption. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1312(1):105–112.
- Reddy, K.S., Kumar, M., Maruthi, V., Umesha, B., Vijayalaxmi, Rao, C.V.K.N., 2015. Dynamics of well irrigation systems and CO₂ emissions in different agroecosystems of South Central India. *Curr. Sci.* 108(11), 2063–2070.
- Rodrigues, G.C., Carvalho, S., Paredes, P., Silva, F.G., Pereira, L.S., 2010. Relating energy performance and water productivity of sprinkler irrigated maize, wheat and sunflower under limited water availability. *Biosyst. Eng.* 106(2):195–204.
- Román-López, A., Inzunza-Ibarra, M.A., Villa-Castorena, M., Catalán-Valencia, E.A., 2011. Modelación del abatimiento de pozos profundos. *Terra Latinoamericana* 29(1):1–10.
- Rothausen, S.G.S.A., Conway, D., 2011. Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. *Nat. Clim. Chang.* 1(4):210–219.
- Scott, C.A., 2013. Electricity for groundwater use: Constraints and opportunities for adaptive response to climate change. *Environ. Res. Lett.* 8(3):1–9.
- Scott, C.A., Shah, T., 2004. Groundwater overdraft reduction through agricultural energy policy: Insights from India and Mexico. *Int. J. Water Resour. Dev.* 20(2):149–164.
- Sheinbaum, C., Chávez, C., Ruíz, J. B., 2010. Producción de energía, en: Jiménez, B.C., Torregrosa, M.L.A., Aboites, L.A. (Eds.), *El Agua en México. Cauces y Encauces*. Academia Mexicana de Ciencias, Ciudad de México, pp. 203–235.
- SIAP, 2017a. Balanza disponibilidad-consumo de maíz grano. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, Ciudad de México. Disponible en: <http://www.numerosdelcampo.sagarpa.gob.mx/publicnew/productosAgricolas/cargarPagina/4> [Consultado el: 10/09/2017].

- SIAP, 2017b. Sistema de información agroalimentaria de consulta (SIACON) 1980-2014. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, Ciudad de México. Disponible en: <http://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119> [Consultado el 04/04/2017].
- SIAP, 2017c. Estadísticas anuales de producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Ciudad de México. Disponible en: http://infosiap.siap.gob.mx/agricola_siap_gb/identidad/index.jsp [Consultado el: 06/08/2017].
- SIAP, 2008. Costos de producción sistema-producto maíz grano. México, D.F.: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <http://www.campomexicano.gob.mx/viocs/> [Consultado el: 06/08/2015].
- SIAP, 2007. Situación actual y perspectivas del maíz en México 1996-2012. México, D.F.: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible en: <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/97923/maiz96-12.pdf> [Consultado el: 12/08/2017].
- SIE, 2017a. Datos sobre el origen y destino de la energía. Sistema de Información Energética, SENER, Ciudad de México. Disponible en: <http://sie.energia.gob.mx> [Consultado el: 03/07/2017].
- SIE, 2017b. Ventas internas de energía eléctrica por tarifa. Sistema de Información Energética, Ciudad de México. Disponible en: <http://sie.energia.gob.mx> [Consultado el 05/07/2017].
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J.M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., Portmann, F.T., 2010. Groundwater use for irrigation - A global inventory. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14(10):1863–1880.
- SINA, 2018. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Ciudad de México : Comisión Nacional del Agua. Disponible en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/> [Consultado el: 02/12/2017].
- Singh, H., Mishra, D., Nahar, N.M., 2002. Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone, India - part I. *Energy Convers. Manag.* 43(16):2275–2286.
- Singh, H., Mishra, D., Nahar, N.M., Ranjan, M., 2003. Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone, India - part II. *Energy Convers. Manag.* 44:1053–1067.
- SNIEG, 2016. Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007. Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica. Procesamiento de Microdatos en el Laboratorio de Microdatos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Ciudad de México.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., Raes, D., 2012. Crop yield response to water. *FAO Irrigation and drainage paper* 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i2800e.pdf> [Consultado el: 21/04/2017].
- Toledo, V.M., Carabias, J., Toledo, C., González, C., 1989. Producción rural de México: Alternativas ecológicas. Fundación Universo XXI, México, D.F.
- Topak, R., Acar, B., Ugurlu, N., 2009. Analysis of energy use and input costs for irrigation in field crop production: A case study for the Konya Plain of Turkey. *J. Sustain. Agric.* 33(7):757–771.
- Tyson, A., George, B., Aye, L., Nawarathna, B., Malano, H., 2012. Energy and greenhouse gas emission accounting framework for groundwater use in agriculture. *Irrig. Drain.* 61(4):542–554.
- Wang, R.L., Stec, A., Hey, J., Lukens, L., Doebley, J., 1999. The limits of selection during maize domestication. *Nature* 398:236–239.
- West, T.O., Marland, G., 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agric. Ecosyst. Environ.* 91(1-3):217–232.
- Zamora, S.S., Fenech, L.L., Ruiz, F.H.E., Pérez, W.D., López, A.G., 2007. Eficiencia en el uso del agua en maíz (*Zea Mays* L.) con riego por goteo, en el Valle de la Paz, Baja California Sur, México. *Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias* 16(3):33–36.

CAPÍTULO IV

Evaluación de los sistemas de producción de maíz en México desde las perspectivas energética, exergética y de emisiones de gases de efecto invernadero³

Resumen

El maíz es el cultivo básico más importante en México y se produce bajo muy diversas condiciones climáticas y socio-económicas. El propósito de este trabajo es estimar el uso de energía, el consumo acumulado de exergía (*CExC*), y las emisiones de gases de efecto invernadero (*GEI*) de distintos sistemas de producción de maíz como indicadores para comparar su desempeño en términos de uso de recursos e impacto ambiental. Considerando los valores promedio calculados, el uso de energía por hectárea, la intensidad energética (*EI*), el cociente energía obtenida - energía usada (*ER*), y la energía neta (*NE*) se encuentran en los rangos 2.3 – 40.2 GJ ha⁻¹, 1.8 – 8.5 MJ kg⁻¹ de grano, 1.7 – 12.0, y 16.3 – 73.1 GJ ha⁻¹, respectivamente. El *CExC* por hectárea, la intensidad exergética (*ExI*), el cociente exergía obtenida - exergía consumida (*ExR*), y la exergía neta (*NEx*) se estimaron en los rangos 2.5 – 52.1 GJ ha⁻¹, 1.9 – 10.7 MJ kg⁻¹ de grano, 1.6 – 14.1, y 19.6 – 86.8 GJ ha⁻¹, respectivamente. Las emisiones de *GEI* por hectárea, la intensidad de *GEI* (*GEII*), y las emisiones de *GEI* por unidad de energía usada (*GEIE_i*) se calcularon en los rangos 152.9 – 3,475.8 kg CO₂e ha⁻¹, 116.5 – 601.9 kg CO₂e Mg⁻¹ de grano, y 63.1 – 117.2 kg CO₂e GJ⁻¹, respectivamente. Los sistemas de producción de temporal con bajos insumos agrícolas muestran los mejores valores de *EI*, *ER*, *ExI*, *ExR*, *GEII* y *GEIE_i*, aunque también exhiben las menores *NE* y *NEx* a consecuencia de sus pobres rendimientos de producción. Los sistemas de producción con riego por gravedad e intensivos en insumos agrícolas poseen las más altas *NE* y *NEx* junto con valores intermedios de *EI*, *ExI*, y *GEII* debido a rendimientos elevados.

IV.1 Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) fue domesticado originalmente en México hace 7,000 – 10,000 años (Tollenaar y Dwyer, 1999) y este país también alberga el mayor número de variedades conocidas de maíz (Arslan y Taylor, 2009). Históricamente, el maíz ha sido el cultivo básico más importante en México, concentrando una gran proporción de la superficie y la producción agrícolas a nivel nacional. Durante el periodo 2000 – 2014, la superficie sembrada de maíz grano en México alcanzó un promedio anual de alrededor de 7.9 millones de hectáreas (ha) con una producción total de casi 21.2 millones de toneladas y un rendimiento de producción cercano a 3.0 Mg ha⁻¹ (SIAP, 2017b). El maíz blanco es la variedad más importante en términos de superficie sembrada (aproximadamente 94% del total) y volumen de producción (91% del total) pues se utiliza primordialmente para consumo humano directo (SIAP, 2017a). El maíz es considerado un alimento básico para la mayoría de la población mexicana (Rooney y Serna-Saldivar, 2003) con un consumo humano per cápita diario de casi 267 g, uno de los más altos en el mundo (Ranum, Peña-Rosas, y García-Casal, 2014). En México, el maíz se cultiva bajo condiciones agro-climáticas y socio-económicas muy heterogéneas, lo que resulta en una diversidad de sistemas de producción, que van desde la pequeña producción

³ Basado en el trabajo: Juárez-Hernández, S., Usón, S., Sheinbaum, P., 2019. Assessing maize production systems in Mexico from an energy, exergy, and greenhouse-gas emissions perspective, *Energy*, 170:199-211.

tradicional de subsistencia hasta la producción comercial a gran escala con uso intensivo en insumos agrícolas modernos (Montañez y Warman, 1982; Toledo, Carabias, Toledo, y González, 1989). En consecuencia, los sistemas de producción de maíz en México utilizan diversas prácticas de manejo y, por lo tanto, muestran diferentes patrones de uso de recursos naturales e impactos ambientales.

La energía en la producción agrícola moderna se usa tanto directamente (e.g. combustibles para operaciones agrícolas, el suministro de riego, etc.) como indirectamente (e.g. fabricación de insumos agrícolas, maquinaria agrícola, etc.) (Dalgaard, Halber, y Porter, 2001). La cantidad y el tipo de energía utilizada en los sistemas de producción agrícola dependen de múltiples factores, incluidos el tipo de cultivo, las prácticas de manejo, las condiciones climáticas, y las características del suelo. En el caso del maíz, varios estudios han evaluado el uso de energía en distintos sistemas de producción y localidades alrededor del mundo. Por ejemplo, se reporta que la producción de maíz de temporal en pequeña escala en Tailandia requiere aproximadamente 6.4 GJ ha^{-1} (Soni, Taewichit, y Salokhe, 2013) mientras que para la siembra de maíz bajo condiciones áridas en la India se calculan cerca de 10.7 GJ ha^{-1} (Singh, Mishra, Nahar, y Ranjan, 2003) en tanto que la producción intensiva de maíz en los EE.UU. demanda entre 30.0 GJ ha^{-1} (Grassini y Cassman, 2012) y 35.4 GJ ha^{-1} (Pimentel, 2004). Sin embargo, los estudios publicados sobre el uso de energía en la producción de maíz en México son escasos. Algunos de estos estudios proporcionan análisis detallados del uso de energía en el cultivo del maíz en algunas comunidades rurales del occidente del país, pero sólo cuantifican los usos directos de energía por unidad de superficie sembrada (Masera, 1990; Masera et al., 1987). Otros estudios comparan el uso de energía en sistemas de producción contrastantes, aunque también se circunscriben a localidades específicas (Orozco, 2007).

Además de energía, los sistemas de producción agrícola requieren insumos materiales, los cuales también deben ser contabilizados para tener una noción más completa de la demanda de recursos naturales. Asimismo, los distintos recursos difieren en cuanto a su calidad o utilidad para un propósito dado, por lo que un análisis meramente cuantitativo basado en las leyes de la conservación de la materia y la energía podría proporcionar una visión equivocada o cuando menos incompleta de la sustentabilidad de un proceso de producción (Dewulf, Van Langenhove, y Van De Velde, 2005). La medición tanto de la cantidad como de la calidad de los flujos de materia y energía en términos de una unidad común puede hacerse a través del concepto de exergía (Hoang y Rao, 2010).

La exergía es la cantidad de trabajo útil que puede obtenerse de un sistema físico cuando éste alcanza el equilibrio termodinámico con el ambiente circundante (Szargut, Morris, y Steward, 1988). El concepto de exergía se desprende de la segunda ley de la termodinámica, la cual establece que todo proceso transformación real conlleva la generación de entropía y, por lo tanto, una disminución o pérdida en la calidad de los recursos natural utilizados en dicho proceso (Bösch, Hellweg, Huijbregts, y Frischknecht, 2007). Puesto que diferentes clases de recursos naturales pueden cuantificarse en unidades de exergía, el método del análisis exergético permite una contabilidad integral de la demanda de recursos naturales, que resulta muy apropiada para la evaluación de la sustentabilidad de procesos y sistemas de producción (Bösch et al., 2007). El método del análisis exergético ha sido aplicado para medir la eficiencia y la sustentabilidad tanto del sector agropecuario en su conjunto (Hoang y Rao, 2010) como de la producción de productos agropecuarios específicos (Moya et al., 2013; Özilgen y Sorgüven, 2011). La producción de maíz también ha sido abordada desde la perspectiva exergética principalmente en estudios que examinan la sustentabilidad de la producción de bio-etanol con maíz, por ejemplo, en los EE.UU. (Patzek, 2004), Canadá (Berthiaume, Bouchard, y Rosen, 2001), y China (Yang, Chen, Ji, He, y Chen,

2009). Sin embargo, estos estudios se enfocan en los sistemas de producción a gran escala e intensivos en insumos agrícolas. En el caso de México, los análisis exergéticos existentes sobre el cultivo de maíz están limitados a sistemas de producción con bajo y medio nivel de uso de insumos en una comunidad rural del estado de Michoacán (Maseira et al., 1987).

Asimismo, las actividades agropecuarias son una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En México, el sector agropecuario contribuye con aproximadamente 12% de las emisiones de GEI totales del país (INECC, 2012). El nivel de emisiones de GEI de la producción agrícola también es función de numerosos factores, por lo que son necesarios estudios específicos para tipo de cultivo y localidad geográfica. Varios estudios han cuantificado las emisiones de GEI de la producción de maíz en distintos sitios del mundo, incluido Tailandia (160.0 kg CO₂e Mg⁻¹ de grano) (Soni et al., 2013), Canadá (243.0 – 353.0 kg CO₂e Mg⁻¹ de grano) (Jayasundara, Wagner-Riddle, Dias, y Kariyapperuma, 2014), y los EE.UU. (254.0 – 825.0 kg CO₂e Mg⁻¹ de grano) (Kim, Dale, y Jenkins, 2009). No obstante, existen pocos trabajos enfocados en la producción de maíz en México, algunos de los cuales sólo contabilizan las emisiones de CO₂ (Orozco, 2007) y otros están restringidos a localidades y sistemas de producción muy específicos (Dendooven et al., 2012; Hennecke et al., 2016).

De ahí que es necesario realizar investigaciones adicionales sobre los flujos de recursos naturales y los impactos ambientales del cultivo de maíz en México, considerando la diversidad de sistemas de producción practicados en el país. Estas investigaciones podrían ayudar a diseñar estrategias para fortalecer la sustentabilidad de la producción de maíz en México. Así, el objetivo del presente trabajo es estimar el uso de energía, el consumo de exergía, y las emisiones de GEI de diferentes sistemas de producción de maíz en México a fin de obtener un conjunto de indicadores útiles para comparar su eficiencia en el uso de recursos naturales y desempeño ambiental.

IV.2. Metodología y fuentes de información

IV.2.1 Sistemas de producción de maíz

Los sistemas de producción de maíz se definieron conforme a la tipología de sistemas agrícolas desarrollada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (SIAP, 2008). Esta tipología está basada en (i) la fuente de agua (temporal, T; riego por gravedad, G; riego por bombeo, B); (ii) el tipo de semilla (semilla criolla, C; semilla mejorada, M); y (iii) uso de fertilizantes sintéticos (sin fertilizantes, S; con fertilizantes, F) (**Tabla IV.1**).

IV.2.2 Insumos y operaciones agrícolas

El inventario de insumos y operaciones agrícolas se obtuvo de los costos de producción de maíz grano reportados por la SAGARPA (SIAP, 2008). Los costos de producción están calculados por hectárea sembrada y detallan las operaciones agrícolas realizadas, la fuente de tracción empleada (i.e. manual, animal, o mecánica), el número de veces y tiempo dedicado a cada operación, los insumos agrícolas aplicados, el porcentaje de productores que realiza cada operación y aplica cada insumo, así como el rendimiento de grano. Los costos de producción están disponibles por sistema de producción de maíz, entidad federativa, y ciclo de producción (i.e. primavera – verano, PV; otoño – invierno, OI). Las operaciones post-cosecha fueron ignoradas porque sólo se reportan para algunos

sistemas de producción y entidades federativas. El Distrito Federal también fue excluido del análisis dado que prácticamente no se desarrolla actividad agrícola en esta entidad.

Tabla IV.1. Sistemas de producción de maíz según la tipología de sistemas agrícolas de (SIAP, 2008).

Sistema de producción	Descripción
TCS	Temporal, semilla criolla, sin aplicación de fertilizantes sintéticos
TCF	Temporal, semilla criolla, con aplicación de fertilizantes sintéticos
TMS	Temporal, semilla mejorada, sin aplicación de fertilizantes sintéticos
TMF	Temporal, semilla mejorada, con aplicación de fertilizantes sintéticos
GCS	Riego por gravedad, semilla criolla, sin aplicación de fertilizantes sintéticos
GCF	Riego por gravedad, semilla criolla, con aplicación de fertilizantes sintéticos
GMS	Riego por gravedad, semilla mejorada, sin aplicación de fertilizantes sintéticos
GMF	Riego por gravedad, semilla mejorada, con aplicación de fertilizantes sintéticos
BCS	Riego por bombeo, semilla criolla, sin aplicación de fertilizantes sintéticos
BCF	Riego por bombeo, semilla criolla, con aplicación de fertilizantes sintéticos
BMS	Riego por bombeo, semilla mejorada, sin aplicación de fertilizantes sintéticos
BMF	Riego por bombeo, semilla mejorada, con aplicación de fertilizantes sintéticos

Para los sistemas de producción de maíz de temporal, los costos de producción estuvieron disponibles principalmente para el ciclo PV con un número limitado de costos de producción para el ciclo OI. Dado que, como se mostrará más adelante, la mayoría de la superficie de maíz de temporal se cultiva en el ciclo PV, los costos de producción correspondientes al ciclo OI fueron omitidos. Los costos de producción de los sistemas de producción TCS, TMS, TCF, y TMF en el ciclo PV abarcaron seis, tres, ocho y 14 entidades federativas, respectivamente (**Tabla IV.2**). Las dosis de aplicación mínima, máxima y promedio de los insumos agrícolas en los sistemas de producción de temporal según lo reportado por (SIAP, 2008) se muestran en la **Tabla IV.3**.

Con respecto a los sistemas de producción con riego, para el sistema de producción GCS sólo se dispuso de información para dos entidades federativas en el ciclo PV, mientras que para el sistema de producción GMS sólo se obtuvo información para una entidad federativa en el ciclo PV y una en el ciclo OI. Dadas estas limitaciones, ambos sistemas de producción fueron excluidos del análisis. Nótese que, como será demostrado posteriormente, los sistemas de producción GCS y GMS representan en conjunto una porción menor de la superficie total de maíz, y por ende su exclusión no afectará significativamente las estimaciones. Para el sistema de producción GCF, se contó con los costos de producción para tres estados en el ciclo PV y uno en el ciclo OI, en tanto que para el sistema de producción GMF, se recopiló información para ocho y siete estados, respectivamente. En cuanto a los sistemas de producción con riego presurizado, los costos de producción estuvieron disponibles sólo para los sistemas de producción BCF y BMF. El primero fue excluido porque sólo se contó con datos para dos entidades federativas en el ciclo PV y también porque concentra una porción marginal de la superficie sembrada total de maíz grano. Para el sistema de producción BMF, se dispuso de costos de producción para seis entidades federativas en el ciclo PV y tres en el ciclo OI. Las cantidades por hectárea sembrada de los insumos relacionados con el uso de riego (i.e. electricidad, diésel, y trabajo humano) fueron tomadas de (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). Las dosis de aplicación mínima, máxima, y promedio de los insumos agrícolas en los sistemas de producción de maíz con riego se presentan en la **Tabla IV.4**.

Tabla IV.2. Sistemas de producción de maíz y entidades federativas cuyos costos de producción de maíz grano según (SIAP, 2008) fueron usados en el presente análisis.

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción PV ^b	Ciclo de producción OI ^c
TCS	Guanajuato (Gto), Guerrero (Gro), Nuevo León (NL), Oaxaca (Oax), San Luis Potosí (SLP), Tabasco (Tab)	
TMS	Aguascalientes (Ags), Oaxaca (Oax), Tabasco (Tab)	
TCF	Chihuahua (Chih), Guanajuato (Gto), Guerrero (Gro), México (Mex), Michoacán (Mich), Oaxaca (Oax), Tlaxcala (Tlax), Veracruz (Ver)	
TMF	Aguascalientes (Ags), Chiapas (Chis), Chihuahua (Chih), Durango (Dgo), Guanajuato (Gto), Guerrero (Gro), Jalisco (Jal), México (Mex), Michoacán (Mich), Morelos (Mor), Oaxaca (Oax), Tabasco (Tab), Tlaxcala (Tlax), Yucatán (Yuc)	
GCF	Guerrero (Gro), Michoacán (Mich), Nuevo León (NL)	Guerrero (Gro)
GMF	Aguascalientes (Ags), Chihuahua (Chih), Durango (Dgo), Guanajuato (Gto), Guerrero (Gro), Jalisco (Jal), Michoacán (Mich), Sinaloa (Sin)	Colima (Col), Guerrero (Gro), Michoacán (Mich), Nuevo León (NL), Sinaloa (Sin), Sonora (Son), Tamaulipas (Tamps)
BMF	Aguascalientes (Ags), Chihuahua (Chih), Guanajuato (Gto), Michoacán (Mich), Nuevo León (NL), Tlaxcala (Tlax)	Baja California Sur (BCS), Guerrero (Gro), Tamaulipas (Tamps)

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b Primavera – verano. ^c Otoño – invierno. Las abreviaturas de las entidades federativas están (entre paréntesis).

Obsérvese que los costos de producción de (SIAP, 2008) no especifican el método de aplicación de los fertilizantes sintéticos, por lo cual se asumió que la aplicación manual se realiza al voleo y la aplicación mecánica mediante una esparcidora, en el caso de fertilizantes sólidos, o un aplicador de amoníaco anhidro (NH₃). Si bien los costos de producción de (SIAP, 2008) se refieren al periodo 2005-2007, los sistemas de producción de maíz grano no han cambiado radicalmente en la última década, por lo que la información puede considerarse como representativa de las prácticas actuales.

IV.2.3 Fronteras del sistema

Las fronteras del sistema abarcaron los principales insumos directos e indirectos de energía y exergía, así como las principales fuentes de emisiones de GEI (i.e. CO₂, N₂O, y CH₄) (**Figura IV.1**). Los insumos indirectos de energía y exergía incluyeron los relativos a la fabricación de semilla, fertilizantes sintéticos, pesticidas, maquinaria agrícola, y equipo de riego al igual que los combustibles fósiles necesarios para el transporte y la distribución de semillas, fertilizantes sintéticos, y pesticidas. Como insumos directos de energía y exergía se consideraron el diésel y la electricidad para las operaciones agrícolas y la aplicación de riego mientras que el trabajo humano y animal sólo se contabilizó en términos energéticos pues fue ignorado en el análisis exergético a fin de evitar problemas de doble conteo (Szargut, 2005). Los insumos de energía y exergía asociados con el agua y la radiación solar fueron omitidos en ambos análisis.

Tabla IV.3. Rango y promedio de las dosis de aplicación por hectárea de los insumos agrícolas en los sistemas de producción de maíz grano de temporal según información reportada en (SIAP, 2008) para el ciclo de producción primavera – verano.

		Sistema de producción ^a							
		TCS		TMS		TCF		TMF	
Insumo agrícola	Unidad	Rango ^b	Media (DE) ^c	Rango	Media (DE)	Rango	Media (DE)	Rango	Media (DE)
Semilla	[kg]	15.0 - 20.0	18.3 (2.1)	15.0 - 20.0	18.3 (2.9)	18.3 - 23.3	22.0 (1.9)	12.0 - 40.0	21.3 (6.6)
Diésel ^d	[L]	10.7 - 45.4	30.3 (13.5)	31.8 - 45.4	40.8 (7.8)	11.9 - 52.1	29.4 (12.8)	18.1 - 58.2	34.1 (12.4)
Trabajo humano ^e	[horas]	30.0 – 133.0	85.8 (44.3)	30.0 – 144.0	87.3 (57.0)	32.0 – 180.7	105.8 (42.8)	14.0 – 344.0	127.9 (86.5)
Trabajo animal ^f	[horas]	-	-	-	-	0.0 – 44.0	13.2 (19.1)	0.0 – 24.0	2.7 (6.8)
N ^g	[kg]	-	-	-	-	33.8 - 142.0	84.4 (41.7)	0.1 - 315.0	93.5 (80.6)
P (como P ₂ O ₅) ^g	[kg]	-	-	-	-	27.3 - 162.9	59.8 (44.7)	26.7 - 92.0	54.1 (20.0)
K (como K ₂ O) ^g	[kg]	-	-	-	-	0.0 - 68.0	9.0 (23.9)	0.0 - 85.0	12.8 (26.6)
Herbicidas	[kg]	0.0 - 1.5	0.3 (0.6)	0.0 - 1.5	0.5 (0.9)	0.0 - 3.0	0.4 (1.0)	0.0 - 1.0	0.1 (0.3)
	[L]	0.0 - 2.5	0.9 (1.1)	0.0 - 2.5	1.2 (1.3)	0.0 - 6.7	1.9 (2.1)	0.3 - 6.0	2.5 (1.6)
Insecticidas	[kg]	0.0 - 12.0	2.8 (4.9)	0.0 - 12.0	4.5 (6.5)	0.0 - 28.0	6.6 (10.3)	0.0 - 26.7	6.1 (9.4)
	[L]	0.0 - 2.0	0.7 (0.8)	0.0 - 2.0	1.0 (1.0)	0.0 - 2.7	0.7 (0.9)	0.0 - 3.1	0.8 (0.8)
Otros pesticidas	[kg]	-	-	-	-	0.0 - 1.3	0.2 (0.5)	0.0 - 0.8	0.1 (0.2)
	[L]	-	-	-	-	-	-	0.0 - 0.4	<0.1 (0.1)
Rendimiento grano	[Mg ha ⁻¹]	1.0 - 2.8	1.7 (0.7)	1.4 - 1.5	1.5 (0.1)	1.5 - 2.8	2.3 (0.5)	1.0 - 5.0	2.8 (1.1)

^a T, temporal; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b Valores mínimo y máximo reportados para las entidades federativas con información disponible. ^c Promedio simple y (desviación estándar) de las dosis de aplicación reportadas. ^d Calculado a partir del uso estimado de diésel en las operaciones agrícolas mecanizadas. ^e Trabajo humano sólo en las operaciones agrícolas manuales. ^f Trabajo animal sólo en las operaciones agrícolas realizadas con animales de tiro. ^g Calculados a partir del contenido típico de N, P₂O₅, and K₂O de los fertilizantes sintéticos aplicados.

Tabla IV.4. Rango y promedio de las dosis de aplicación por hectárea de los insumos agrícolas en los sistemas de producción de maíz con riego según información reportada en (SIAP, 2008).

Insumo agrícola	Unidad	Sistema de producción ^a											
		GCF				GMF				BMF			
		Ciclo PV ^b		Ciclo OI ^c		Ciclo PV		Ciclo OI		Ciclo PV		Ciclo OI	
		Rango ^d	Media (DE) ^e	Rango	Media (DE)	Rango	Media (DE)	Rango	Media (DE)	Rango	Media (DE)	Rango	Media (DE)
Semilla	[kg]	15.0 - 25.0	18.3 (5.8)	-	20.0	15.0 - 28.0	22.9 (4.0)	17.1 - 30.0	21.2 (4.1)	20.0 - 30.0	24.7 (3.3)	20.0 - 75.0	40.0 (30.4)
Diésel ^f	[L]	18.1 - 31.9	25.7 (7.0)	-	23.7	26.1 - 79.9	52.5 (19.9)	30.9 - 110.8	55.5 (26.8)	33.1 - 111.0	62.7 (27.5)	13.2 - 101.8	60.1 (44.6)
Trabajo humano ^g	[horas]	39.0 - 352.0	176.3 (160.0)	-	140.0	2.0 - 116.6	44.9 (47.7)	0.0 - 166.0	60.2 (72.5)	0.0 - 76.0	32.9 (29.4)	0.0 - 168.0	56.0 (97.0)
Trabajo animal ^h	[horas]	0.0 - 5.0	1.7 (2.9)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0 - 16.0	5.3 (9.2)
N ⁱ	[kg]	23.0 - 138.0	83.7 (57.8)	-	90.0	30.1 - 253.0	160.2 (70.9)	59.9 - 295.0	172.5 (82.6)	103.0 - 273.0	172.9 (61.7)	16.1 - 59.8	41.8 (22.8)
P (como P ₂ O ₅) ^j	[kg]	0.0 - 69.0	46.0 (39.8)	-	69.0	0.0 - 103.5	54.3 (42.8)	0.0 - 103.5	45.2 (36.9)	46.0 - 161.0	102.0 (49.2)	0.0 - 46.0	28.7 (25.0)
K (como K ₂ O) ^j	[kg]	-	-	-	-	0.0 - 45.0	9.5 (16.4)	0.0 - 30.0	4.3 (11.3)	0.0 - 45.0	7.5 (18.4)	-	-
Herbicidas	[kg]	-	-	-	-	0.0 - 0.3	<0.1 (0.1)	-	-	0.0 - 1.0	0.2 (0.4)	-	-
	[L]	2.0 - 6.0	4.0 (2.0)	-	5.0	0.0 - 6.0	2.3 (2.0)	0.0 - 3.0	0.9 (1.1)	0.0 - 2.0	1.4 (0.8)	0.0 - 4.0	1.8 (2.0)
Insecticidas	[kg]	0.0 - 80.0	26.7 (46.2)	-	-	0.0 - 29.3	10.1 (11.0)	0.0 - 15.0	2.1 (5.7)	0.0 - 16.5	4.1 (6.7)	-	-
	[L]	0.0 - 1.0	0.3 (0.6)	-	-	0.0 - 10.5	2.0 (3.5)	0.0 - 3.8	1.5 (1.4)	0.0 - 3.0	1.1 (1.2)	0.0 - 1.1	0.7 (0.6)
Otros pesticidas	[kg]	-	-	-	-	0.0 - 0.3	<0.1 (0.1)	0.0 - 1.0	0.1 (0.4)	0.0 - 0.5	0.1 (0.2)	-	-
	[L]	-	-	-	-	-	-	0.0 - 0.8	0.1 (0.3)	-	-	-	-
Irrigación ^l													
Agua aplicada	[mm]	7.1 - 758.8	209.3 (107.0)	306.6 - 838.7	551.1 (110.1)	7.1 - 758.8	252.1 (98.6)	306.6 - 838.7	521.7 (38.6)	5.7 - 669.8	249.7 (154.8)	255.0 - 738.1	564.3 (80.2)
Trabajo humano	[horas]	-	2.0	-	2.0	-	2.0	-	2.0	0.4 - 2.2	1.6 (0.4)	0.2 - 2.5	1.6 (0.4)
Electricidad	[kWh]	0.7 - 3,656.6	424.2 (530.1)	0.0 - 6,488.5	627.9 (1,164.5)	0.0 - 2,736.2	294.7 (508.0)	0.0 - 5,699.2	92.7 (464.2)	19.0 - 4,462.4	2,064.9 (1,594.7)	427.9 - 6,107.4	2,936.3 (1,830.3)
Diésel	[L]	<0.1 - 35.3	4.1 (5.1)	0.0 - 62.6	6.1 (11.2)	0.0 - 26.4	2.9 (4.9)	0.0 - 55.0	0.9 (4.5)	0.2 - 43.1	19.9 (15.4)	4.1 - 58.9	28.3 (17.7)
Rendimiento	[Mg ha ⁻¹]	2.8 - 4.9	3.9 (1.0)	-	3.0	5.4 - 8.1	6.7 (1.0)	3.3 - 9.2	5.4 (1.9)	4.0 - 9.0	6.8 (2.0)	4.0 - 6.3	4.9 (1.2)

^a G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b Primavera - verano. ^c Otoño - invierno. ^d Valores mínimo y máximo reportados para las entidades federativas con información disponible, excepto para los insumos relacionados con la aplicación de riego. ^e Promedio simple y (desviación estándar) de las dosis de aplicación reportadas, excepto para los insumos relacionados con la aplicación de riego. ^f Calculado a partir del uso estimado de diésel en las operaciones agrícolas mecanizadas. ^g Trabajo humano sólo en las operaciones agrícolas manuales. ^h Trabajo animal sólo en las operaciones agrícolas realizadas con animales de tiro. ⁱ Calculados a partir del contenido típico de N, P₂O₅, and K₂O de los fertilizantes sintéticos aplicados. ^j Valores mínimo y máximo de los valores estatales calculados; la media y la desviación estándar corresponden a la media y la desviación estándar ponderadas utilizando como factor de ponderación la superficie sembrada en cada estado de la República bajo cada sistema de producción de maíz con riego; el trabajo humano es sólo para la aplicación del riego a la parcela; en los sistemas de producción con riego por gravedad, los insumos de electricidad y diésel son los estimados sólo para la extracción de agua de pozo profundo; en los sistemas de producción con riego por bombeo (presurizado), los insumos de electricidad y diésel incluyen los estimados tanto para la extracción de agua de pozo profundo como para la operación de los sistemas de riego presurizado.

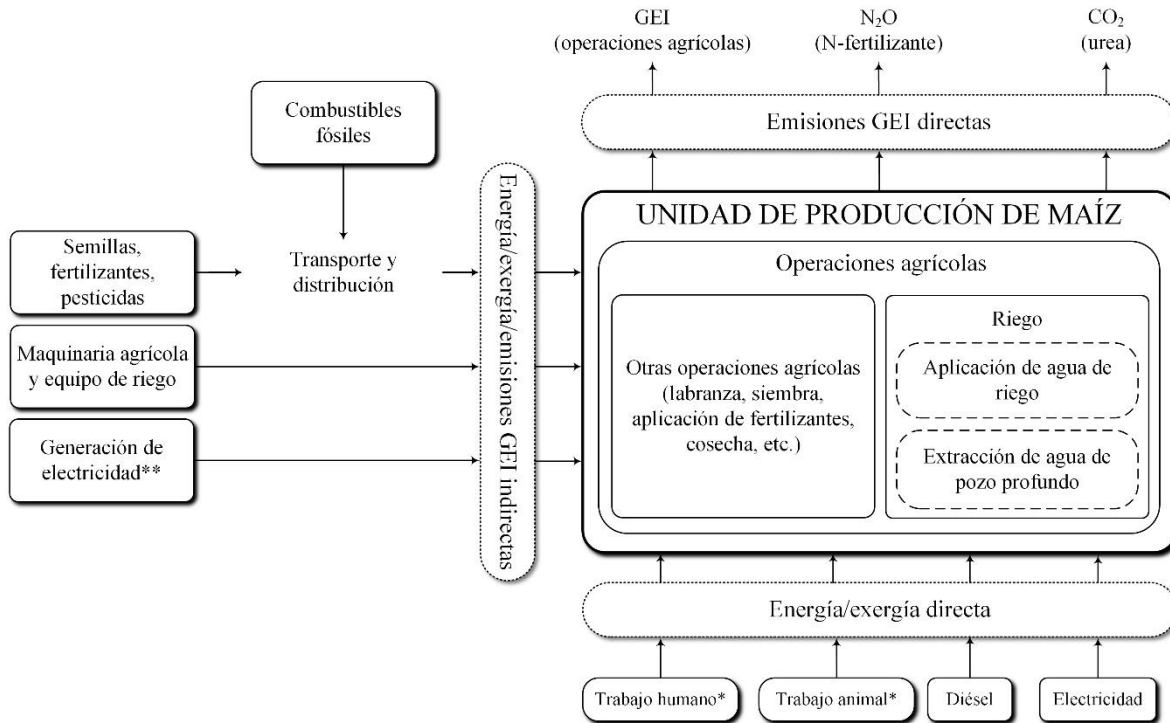


Figura IV.1. Representación de las fronteras del sistema donde se muestran los insumos directos e indirectos de energía y exergía, así como las fuentes directas e indirectas de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) consideradas. (* El trabajo humano y animal sólo se contabilizó como insumo directo de energía. ** Las emisiones de GEI de la generación de electricidad se contabilizaron como fuente indirecta de emisiones.)

Las fuentes de emisiones indirectas de GEI incluyeron la fabricación de semillas, fertilizantes sintéticos, pesticidas, maquinaria agrícola y equipo de riego, así como la quema de combustibles fósiles para el transporte y la distribución de los insumos agrícolas y la generación de electricidad para la aplicación de riego. Las fuentes de emisiones directas de GEI incluyeron las emisiones asociadas a la aplicación de fertilizantes sintéticos y al consumo de diésel en las operaciones agrícolas. En las primeras se consideró las emisiones directas de N₂O por el uso de fertilizantes nitrogenados y las emisiones de CO₂ por el uso de urea. Las emisiones indirectas de N₂O por volatilización y escurrimiento de los fertilizantes nitrogenados aplicados no fueron cuantificadas. Como producto final sólo se consideró al maíz grano por lo que la producción de residuos agrícolas fue ignorada.

IV.2.4 Estimación del uso de energía

IV.2.4.1 Uso indirecto de energía

El uso de energía por hectárea sembrada asociado a la fabricación de los insumos agrícolas utilizados ($En_{Insumos}$, i.e. semillas, fertilizantes sintéticos, y pesticidas) se calculó de la siguiente manera:

$$En_{Insumos} = \sum_i (En_{insumo,i} \times Cantidad_i \times \%_{Productores_i}) \quad (IV.1)$$

Donde En_{insumo} es el uso de energía para la fabricación del insumo i en MJ kg^{-1} ó MJ L^{-1} , $Cantidad$ es la dosis de aplicación del insumo i en kg ha^{-1} ó L ha^{-1} , y $\%_{\text{Productores}}$ es la fracción de productores que usa el insumo i según (SIAP, 2008). Los valores En_{insumo} se tomaron de la bibliografía (Tabla IV.5).

Tabla IV.5. Uso de energía y consumo acumulado de exergía (CExC) asociado a la fabricación de insumos agrícolas.

Insumo agrícola	Unidad	Energía	Referencia	CExC	Referencia
		[MJ unidad ⁻¹]		[MJ unidad ⁻¹]	
Semilla mejorada	[kg]	45.3	(Camargo, Ryan, y Richard, 2013)	52.1	Cálculo propio ^h
Semilla criolla ^a	[kg]	14.7	(Pimentel y Pimentel, 2008)	16.9	Cálculo propio ^h
Cloruro de potasio	[kg]	8.0	(GREET, 2015)	11.5	Cálculo propio ⁱ
Nitrato de potasio	[kg]	11.0	(GREET, 2015)	12.8	Cálculo propio ⁱ
Fosfato diamónico	[kg]	19.0	(GREET, 2015)	23.3	Cálculo propio ^k
Fosfato monoamónico	[kg]	16.0	(GREET, 2015)	19.9	Cálculo propio ^k
Amoníaco anhidro	[kg]	42.0	(GREET, 2015)	48.2	(Szargut, 2005)
Nitrato de amonio	[kg]	21.0	(GREET, 2015)	25.1	(Kirova-Yordanova, 1998)
Sulfato de amonio	[kg]	11.0	(GREET, 2015)	20.8	Cálculo propio ^l
Superfosfato simple	[kg]	1.7	(Mudahar y Hignett, 1987)	15.4	Cálculo propio ^m
Superfosfato triple	[kg]	9.3	(GREET, 2015)	26.7	(Kirova-Yordanova, 1998)
Urea	[kg]	30.0	(GREET, 2015)	33.3	(Kirova-Yordanova, 1998)
Fórmula NPK	[kg]	11.6	(Lewis, 1982)	15.6	Cálculo propio ⁿ
Insecticidas	[kg]	38.3 ^b	(Green, 1987)	56.5	Cálculo propio ^e
	[L]	132.7 ^b	(Green, 1987)	173.9	Cálculo propio ^e
Herbicidas	[kg]	203.9 ^b	(Green, 1987)	371.6	Cálculo propio ^e
	[L]	90.6 ^b	(Green, 1987)	153.5	Cálculo propio ^e
Fungicidas	[kg]	118.5 ^b	(Green, 1987)	160.0	Cálculo propio ^e
	[L]	108.2 ^b	(Green, 1987)	120.4	Cálculo propio ^e
Rodenticidas	[kg]	225.8 ^c	(Green, 1987)	291.1	Cálculo propio ^e
Maquinaria agrícola	[kg]	108.0	(Pimentel, 2004)	118.0 ^p	(Patzek, 2004)
Diésel	[L]	42.8 ^d	(GREET, 2015)	43.9	(Ptasinski, 2016)
Diésel (marítimo)	[L]	44.8 ^e	(GREET, 2015)	48.6	(Ptasinski, 2016; Szargut, 2005)
Queroseno	[L]	36.3 ^f	(GREET, 2015)	39.6	(Ptasinski, 2016; Szargut, 2005)
Electricidad	[kWh]	9.9	Cálculo propio ^g	12.5	Cálculo propio ^q

^a También llamada semilla nativa o local. ^b Promedio de los valores estimados para los insecticidas, herbicidas y fungicidas aplicados según el uso de energía para la fabricación, formulación, y empaque de (Green, 1987). ^c Valor estimado como el promedio del uso de energía en la fabricación, formulación, y empaque de todos los pesticidas reportados en (Green, 1987). ^d Poder calorífico neto (PCN) igual a 35.7 MJ L⁻¹; aproximadamente 7.1 MJ L⁻¹ estarían relacionados con el uso de energía en las operaciones *aguas arriba*. ^e PCN igual a 40.0 MJ L⁻¹; aproximadamente 5.8 MJ L⁻¹ estarían asociados con el uso de energía en las operaciones *aguas arriba*. ^f PCN igual a 31.9 MJ L⁻¹; aproximadamente 4.3 MJ L⁻¹ estarían asociados con el uso de energía en las operaciones *aguas arriba*. ^g Calculado a partir de la eficiencia de generación y la mezcla de combustibles promedio anual para el periodo 2004 – 2008 con datos de (SIE, 2017b), el uso de energía *aguas arriba* en el procesamiento de los combustibles fósiles según (GREET, 2015), y pérdidas de transmisión, transformación y distribución de electricidad iguales a 6% (CFE, 2014). ^h Calculado a partir de la relación energía – CExC para la semilla de maíz según valores reportados en (Patzek, 2004). ⁱ Calculado considerando silvita como materia prima con un contenido de K₂O de 63% (IPNI, 2010), eficiencia de producción de KCl de 85% (Patel, 2013), uso de energía en la producción de KCl según (GREET, 2015), exergía química de la silvita (18.5 kJ mol⁻¹) según (Valero, Valero, y Vieillard, 2012), cocientes exergía – energía de los insumos energéticos según (Szargut, 2005), y grado acumulado de perfección (CDP, i.e. cociente exergía útil – CExC) según (Ptasinski, 2016). ^j Calculado a partir de los insumos materiales para la producción de nitrato de potasio según (GREET, 2015) y el CExC de los insumos materiales según (Kirova-Yordanova, 1998). ^k Calculado a partir de los insumos energéticos y materiales para la producción de fosfato diamónico según (GREET, 2015), el CExC de los insumos materiales según (Kirova-Yordanova, 1998; Szargut, 2005), el cociente exergía – energía para los insumos energéticos según (Szargut, 2005), y el CDP correspondiente según (Ptasinski, 2016). ^l Calculado a partir de los insumos materiales para la producción de sulfato de amonio según (GREET, 2015) y el CExC de los insumos materiales según (Szargut, 2005). ^m Calculado a partir de los insumos energéticos y materiales para la producción de superfosfato simple según (Salami, Ahmadi, y Keyhani, 2010), la exergía química de la roca fosfórica (19.4 kJ mol⁻¹) según (Szargut, 2005), el uso de energía para el beneficio de la roca fosfórica según (GREET, 2015), una eficiencia de producción de 100%, el cociente exergía – energía de los insumos energéticos según (Szargut, 2005), y el CDP correspondiente según (Ptasinski, 2016). ⁿ Calculado considerando 17-17-17 y el CExC correspondiente según (Brehmer, Struik, y Sanders, 2008). ^o Calculado a partir del CExC de insecticidas, herbicidas y fungicidas (344.0, 368.0, y 256.0 MJ kg⁻¹ de ingrediente activo, respectivamente) según (Ptasinski, 2016); las cifras por L fueron calculadas empleando las densidades promedio (1.1, 1.1, y 3.8 kg L⁻¹ de producto, respectivamente). ^p Media del rango reportado. ^q Calculado a partir de la proporción anual promedio de hidroelectricidad y electricidad producida con combustibles fósiles en el total de electricidad generada en el periodo 2000 – 2008 en México según datos de (SIE, 2017c) y un CExC de 4.2 MJ MJ⁻¹ y 6.0 × 10⁻³ MJ MJ⁻¹, respectivamente (Ptasinski, 2016).

De manera similar, para estimar el uso de energía por hectárea relacionado con la fabricación de maquinaria agrícola empleada ($En_{Maquinaria}$) se utilizó la expresión abajo mostrada:

$$En_{Maquinaria} = \sum_i (En_{maquinaria,i} \times N_i \times \%_{Productores_i}) \quad (IV.2)$$

Donde $En_{maquinaria}$ es la energía embutida en la maquinaria usada en la operación i en $MJ ha^{-1}$, N es el número de veces que se realiza la operación i por hectárea, y $\%_{Productores}$ es la fracción de productores que realiza la operación i . La $En_{maquinaria}$ también se estimó a partir de información disponible en la bibliografía (**Tabla IV.6**). La energía embutida en las herramientas manuales y en los implementos utilizados en las operaciones con tracción animal fue ignorada. La energía embutida en los equipos de riego (En_{IrrEq} en $MJ ha^{-1}$) sólo se consideró para el sistema de producción BMF, con datos de (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018).

El uso de energía para el transporte internacional de los insumos agrícolas importados y el transporte interno de los insumos importados y de fabricación nacional fue estimado a partir de la información sobre importaciones, exportaciones y fabricación nacional de fertilizantes sintéticos, pesticidas, y semilla mejorada de (ANACOFER, 2006, 2011; FAOSTAT, 2016; SIAVI, 2016; SIE, 2017a; SNICS, 2016) para el periodo 2004 – 2008. Los países de origen de las importaciones fueron consultados en (SIAVI, 2016) y los respectivos puntos de salida en (NATS, 2015; SCT, 2010; SIAP, 2016) en tanto que los puntos de entrada a México se obtuvieron de (SIAP, 2016). Con esta información se estimó una distancia de traslado y una estructura modal promedio para cada país exportador e insumo agrícola. El transporte de los insumos importados dentro de los países de origen fue ignorado, excepto para las importaciones provenientes de los EE.UU. debido a la ubicación geográfica de este país respecto a México. Para estas últimas, la distancia promedio de traslado a la frontera mexicana por modo de transporte fue aproximada con datos de (DOT-DOC, 2010). Las intensidades energéticas del transporte marítimo, transporte ferroviario, autotransporte, y transporte aéreo se asumieron iguales a 0.04, 0.20, 0.78 (GREET, 2015), y 20.00 (Dutilh y Linnemann, 2004) $MJ ton^{-1} km^{-1}$, respectivamente. La aportación relativa de cada país de origen al volumen total importado, así como la participación de las importaciones en el consumo nacional aparente de cada insumo agrícola fueron utilizadas para obtener un promedio ponderado del uso de energía para transporte de las importaciones por tonelada de insumo (**Tabla IV.7**).

Respecto al transporte interno en México, se asumió la estructura modal siguiente: 80% autotransporte, 11% transporte ferroviario, 9% transporte marítimo (IMT, 2015) con intensidades energéticas de 0.78, 0.32, y 0.31 $MJ ton^{-1} km^{-1}$ (GREET, 2015; SCT, 2015), respectivamente, y las distancias de traslado reportadas en (IMT, 2015; SCT, 2010, 2015). Para el transporte de distribución, se asumió que éste depende enteramente del autotransporte con una intensidad energética de 1.12 $MJ ton^{-1} km^{-1}$ y una distancia de traslado de 50 km (GREET, 2015). Los equivalentes energéticos de los combustibles para el transporte incluyeron el uso de energía *aguas arriba* en su procesamiento según datos de (GREET, 2015). La energía embutida en vehículos e infraestructura de transporte no fue contabilizada. Así entonces, el uso de energía por hectárea asociado al transporte y la distribución de los insumos agrícolas (En_{Transp}) fue estimado como sigue:

$$En_{Transp} = \sum_i (En_{transp,i} \times Cantidad_i \times \%_{Productores_i}) \quad (IV.3)$$

Donde En_{transp} es el uso de energía asociado al transporte del insumo i en $MJ kg^{-1}$ ó $MJ L^{-1}$.

Tabla IV.6. Uso estimado de diésel en las operaciones agrícolas mecanizadas y energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) embutidas en la maquinaria agrícola utilizada en cada operación. Valores por hectárea sembrada.

Maquinaria agrícola utilizada en cada operación: valores por hectárea sembrada.								
Rubro	Operación	Diésel	Referencia	Maquinaria agrícola				
		Equipo		Energía embutida ^a	Emisiones de GEI embutidas ^b			
				[L]	[MJ]	[kg CO ₂]	[kg N ₂ O]	[kg CH ₄]
Acondicionamiento del terreno	Chapeo ^c	10.5	(Lora, Ramos, y Fernández, 2015)	Tractor + chapeadora	67.0	6.0	8.0 × 10 ⁻⁵	7.4 × 10 ⁻³
	Nivelación	10.4	(Hetz y Villalobos, 1985)	Tractor + cuchilla niveladora	66.4	5.9	7.9 × 10 ⁻⁵	7.3 × 10 ⁻³
	Empareje ^d	5.0	(Boto, Pastrana, y Cepeda, 2005)	Tractor + rodillo	31.9	2.9	3.8 × 10 ⁻⁵	3.5 × 10 ⁻³
Preparación del suelo	Barbecho	11.9	(Masera et al., 1987)	Tractor + arado de discos	102.0	9.1	1.2 × 10 ⁻⁴	1.1 × 10 ⁻²
	Subsileo ^e	14.6	(Bowers, 1992)	Tractor + arado de subsuelo	93.1	8.3	1.1 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻²
	Rastreo simple	3.8	(Masera et al., 1987)	Tractor + rastra de discos	55.0	4.9	6.6 × 10 ⁻⁵	6.1 × 10 ⁻³
	Surcado	5.6	(Lora et al., 2015)	Tractor + surcador	20.5	1.8	2.4 × 10 ⁻⁵	2.3 × 10 ⁻³
Siembra	Siembra	5.7	(Masera et al., 1987)	Tractor + sembradora	58.0	5.2	6.9 × 10 ⁻⁵	6.4 × 10 ⁻³
Fertilización	Aplicación de fertilizantes sólidos	5.6	(Bond y Beard, 1997)	Tractor + esparcidora	60.0	5.4	7.2 × 10 ⁻⁵	6.6 × 10 ⁻³
	Inyección de amoníaco (NH ₃)	8.0	(Camargo et al., 2013)	Tractor + aplicador de NH ₃	60.0	5.4	7.2 × 10 ⁻⁵	6.6 × 10 ⁻³
Control de maleza y plagas	Deshierbe ^f	4.8	(Masera et al., 1987)	Tractor + cultivador	42.0	3.8	5.0 × 10 ⁻⁵	4.6 × 10 ⁻³
	Azadoneo	1.9	(Bond y Beard, 1997)	Tractor + azada rotativa	10.6	0.9	1.3 × 10 ⁻⁵	1.2 × 10 ⁻³
	Aplicación de pesticidas	0.9	(Bond y Beard, 1997)	Tractor + aspersora	56.0	5.0	6.7 × 10 ⁻⁵	6.2 × 10 ⁻³
Labores generales de cultivo	Aporque ^g	4.2	(Bond y Beard, 1997)	Tractor + aporcadora	23.9	2.1	2.8 × 10 ⁻⁵	2.6 × 10 ⁻³
Riego y drenaje	Bordeo y canalización ^h	5.6	(Lora et al., 2015)	Tractor + border	20.5	1.8	2.4 × 10 ⁻⁵	2.3 × 10 ⁻³
Cosecha	Cosecha ⁱ	15.0	(Bond y Beard, 1997)	Combinada + cabezal para maíz	186.0	16.7	2.2 × 10 ⁻⁴	2.1 × 10 ⁻²
	Corte y agavillado ^j	10.8	(Bond y Beard, 1997)	Tractor + agavilladora	66.0	5.9	7.9 × 10 ⁻⁵	7.3 × 10 ⁻³

^a Calculado a partir de valores reportados en (Bowers, 1992; West y Marland, 2002). ^b Calculados a partir de la mezcla de energéticos para la fabricación, transporte y reparación de la maquinaria agrícola según (West y Marland, 2002). ^c Chapeo o desvare. ^d Empareje, aplanado o apisonado. ^e Subsuelo o cinceleo. ^f Deshierbe, escarda o pormedeo. ^g Aporque o cajeteo. ^h Conservación de curvas de nivel, borrado de curvas de nivel, tumba de canales o bordos, tumba de regaderas, construcción de regaderas, o bordeo. ⁱ Trilla o cosecha. ^j Agavillado, amogotado, o corte y agavillado.

IV.2.4.2 Uso directo de energía

El trabajo humano y animal, el diésel y la electricidad asociados a las operaciones agrícolas y la aplicación de riego se cuantificaron a partir de información disponible en la bibliografía. Se dio preferencia a valores reportados para el cultivo del maíz en México (Lewis, 1951; Masera, 1990; Masera et al., 1987; Pimentel y Pimentel, 2008).

Tabla IV.7. Uso de energía y consumo acumulado de exergía (CExC) estimados en el transporte y la distribución de insumos agrícolas.^a

Insumo agrícola	Participación de las importaciones en el CNA ^b [%]	Transp. de importaciones ^e		Transporte interno		Distribución interna	
		Energía [MJ ton ⁻¹]	CExC ^f [MJ ton ⁻¹]	Energía [MJ ton ⁻¹]	CExC ^f [MJ ton ⁻¹]	Energía [MJ ton ⁻¹]	CExC ^f [MJ ton ⁻¹]
Semilla mejorada	7.0	33.1	34.5	418.1	429.7	64.8	66.6
Semilla criolla ^c	0.0	-	-	-	-	-	-
Cloruro de potasio	100.0	254.0	271.8	418.1	429.7	64.8	66.6
Nitrato de potasio	100.0	515.4	540.8	418.1	429.7	64.8	66.6
Fosfato diamónico	100.0	97.2	104.9	418.1	429.7	64.8	66.6
Fosfato monoamónico	100.0	207.8	221.9	418.1	429.7	64.8	66.6
Amoníaco anhidro	0.0	-	-	418.1	429.7	64.8	66.6
Nitrato de amonio	78.5	428.4	463.3	418.1	429.7	64.8	66.6
Sulfato de amonio	4.0	16.1	17.4	418.1	429.7	64.8	66.6
Superfosfato simple	0.0	-	-	418.1	429.7	64.8	66.6
Superfosfato triple	0.0	-	-	418.1	429.7	64.8	66.6
Urea	100.0	439.2	476.3	418.1	429.7	64.8	66.6
Fórmula NPK	100.0	508.5	549.2	418.1	429.7	64.8	66.6
Insecticidas ^d	56.1	1,879.9	2,043.4	418.1	429.7	64.8	66.6
Herbicidas ^d	57.4	447.1	481.2	418.1	429.7	64.8	66.6
Fungicidas ^d	86.6	5,544.3	6,044.0	418.1	429.7	64.8	66.6
Rodenticidas	58.7	359.1	382.2	418.1	429.7	64.8	66.6

^a Sólo incluye el consumo de combustibles fósiles en el transporte y la distribución de los insumos agrícolas. ^b CNA, Consumo Nacional Aparente (producción nacional + importaciones – exportaciones); promedio estimado para el periodo 2004 – 2008. ^c También llamada semilla nativa o local; los productores que utilizan este tipo de semilla generalmente la obtienen de cosechas anteriores, por lo que no se requiere transporte y distribución. ^d Los valores por L de producto fueron estimados a partir de las densidades típicas (en kg L⁻¹) de insecticidas, herbicidas, y fungicidas. ^e Promedio ponderado según la participación de las importaciones en el CNA estimado (véase la sección 2.4.1 para mayores detalles). ^f Calculado a partir del CExC de los combustibles fósiles utilizados.

Para las operaciones agrícolas sin datos disponibles específicos para el maíz, se emplearon valores estándar. El uso de energía por hectárea sembrada en las operaciones agrícolas ($En_{Operaciones}$) fue calculado de esta manera:

$$En_{Operaciones} = \sum_i (En_{operación,i} \times N_i \times \%_{Productores_i}) \quad (IV.4)$$

Donde $En_{operación}$ es el uso de energía en la operación agrícola i en MJ ha⁻¹. Para las operaciones mecanizadas, la $En_{operación}$ se determinó a partir del uso de diésel, en L ha⁻¹ (Tabla IV.6), y el equivalente energético del diésel, en MJ L⁻¹. Para las operaciones manuales, la $En_{operación}$ se obtuvo considerando los requerimientos de trabajo humano, en MJ h⁻¹ de trabajo, tomados de la bibliografía (Tabla IV.8) y el tiempo dedicado a cada operación, en h ha⁻¹, conforme a (SIAP, 2008). En el caso de las operaciones realizadas con animales de tiro, la $En_{operación}$ se recabó de fuentes

bibliográficas, expresada en MJ ha⁻¹ (**Tabla IV.9**). El trabajo humano relacionado con la operación de la maquinaria agrícola y la conducción de los animales de tiro fue omitido. En los sistemas de producción GCF y GMF, el uso directo de energía para la aplicación de riego (En_{irr} , en MJ ha⁻¹) incluyó la electricidad y el diésel para la extracción de agua de pozo profundo, así como el trabajo humano para la aplicación del agua de riego a la parcela. En el caso del sistema de producción BMF, la En_{irr} también incluyó la electricidad y el diésel para la operación de los sistemas de riego presurizado. Los valores anteriores se tomaron de (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018).

Tabla IV.8. Energía humana estimada asociada a las operaciones agrícolas manuales.

Rubro	Operación	Energía humana [MJ h ⁻¹ de trabajo]	Referencia
Acondicionamiento del terreno	Labores de limpieza ^a	1.3	(Haswell, 1981)
	Trazo de curvas de nivel	2.4	(Stout, 1990)
	Chapeo ^b	1.8	(Stout, 1990)
Preparación del suelo	Subsoleo ^c	2.4	(Stout, 1990)
Siembra	Siembra	1.6	(Haswell, 1981)
Fertilización	Aplicación de fertilizantes	1.7	(Stout, 1990)
Control de maleza y plagas	Deshierbe	1.1	(Haswell, 1981)
	Azadoneo	1.5	(Stout, 1990)
	Aplicación de pesticidas	1.7	(Stout, 1990)
	Pajareo	1.5	(Haswell, 1981)
Labores generales de cultivo	Aporque ^d	1.6	(Haswell, 1981)
	Desbrote ^e	1.3	(Haswell, 1981)
Riego y drenaje	Bordeo	1.6	(Stout, 1990)
Cosecha	Despunte	0.8	(Haswell, 1981)
	Cosecha ^f	0.8	(Haswell, 1981)
	Encostale	1.3	(Haswell, 1981)
	Agavillado ^g	1.9	(Haswell, 1981)
	Corte y agavillado	3.8	(Haswell, 1981)

^a Limpia general del terreno; limpia y quema; limpia de canal; limpia de regaderas. ^b Chapeo; desvare. ^c Subsoleo; cinceleo. ^d Aporque; cajeteo. ^e Desbrote o desahíje; dobla. ^f Cosecha; pizca. ^g Agavillado o amogotado; recolección de forraje.

Tabla IV.9. Energía animal estimada asociada a las operaciones agrícolas realizadas con animales de tiro.

Rubro	Operación	Energía animal ^a [MJ ha ⁻¹]	Referencia
Preparación del suelo	Barbecho	420.0	(Masera, 1990)
	Rastreo simple	157.5	(Masera, 1990)
	Surcado	117.6	(Lewis, 1951; Pimentel y Pimentel, 2008)
Siembra	Siembra	189.0	(Masera, 1990)
Control de maleza y plagas	Deshierbe ^b	100.8	(Masera et al., 1987)
Labores generales de cultivo	Aporque ^c	504.0	(Lewis, 1951; Pimentel y Pimentel, 2008)

^a Calculada considerando 10.5 MJ h⁻¹ de trabajo (Bowers, 1992). ^b Deshierbe; escarda o pormedeo; azadoneo. ^c Aporque; cajeteo.

Los equivalentes energéticos del diésel y la electricidad (**Tabla IV.5**) incorporaron el uso de energía *aguas arriba* para su producción. Finalmente, el uso total de energía por hectárea fue obtenido de la siguiente manera:

$$En_{Total} = En_{indirecto} + En_{directo} \quad (IV.5)$$

con:

$$En_{indirecto} = En_{Insumos} + En_{Maquinaria} + En_{IrrEq} + En_{Transp} \quad (IV.6)$$

$$En_{directo} = En_{Operaciones} + En_{Irr} \quad (IV.7)$$

Adicionalmente, se calcularon los indicadores siguientes: intensidad energética (EI , uso total de energía por hectárea dividido entre el rendimiento de grano por hectárea); cociente energía obtenida – energía usada (ER , equivalente energético del grano producido por hectárea dividido entre el uso total de energía por hectárea), y energía neta (NE , equivalente energético del grano producido por hectárea menos el uso total de energía por hectárea). El equivalente energético del grano fue estimado considerando 18.3 MJ kg^{-1} de grano (m.s.) (Ptasinski, 2016) y un contenido de humedad del grano de 25% (Pimentel, 2004).

IV.2.5 Estimación del consumo de exergía

El consumo de exergía fue calculado como el consumo acumulado de exergía ($CExC$), el cual se define como la exergía de todos los insumos energéticos y materiales (Ex) suministrados a lo largo de la cadena de producción de un producto dado por unidad de producto elaborado (m) (Szargut, 2005):

$$CExC = \frac{\sum_i Ex_i}{m} \quad (IV.8)$$

Para fines de cálculo, la exergía de los insumos energéticos normalmente se deriva de los cocientes exergía – poder calorífico de los energéticos mientras que en el caso de los insumos materiales, se utiliza su exergía química (Bösch et al., 2007).

IV.2.5.1 Consumo indirecto de exergía

El $CExC$ asociado a la fabricación de semillas, fertilizantes sintéticos, pesticidas, maquinaria agrícola y equipo de riego, así como a los combustibles fósiles utilizados en el transporte y la distribución de los insumos agrícolas, fue contabilizado como $CExC$ indirecto. Los valores del $CExC$ de la fabricación de los insumos agrícolas fueron recopilados de fuentes bibliográficas (**Tabla IV.5**). Nótese que, para varios de los insumos, el $CExC$ tuvo que ser estimado a partir del inventario de los principales insumos energéticos y materiales del proceso de producción y sus correspondientes valores de $CExC$ tomados de la bibliografía. El $CExC$ por hectárea se determinó con las fórmulas enseguida mostradas:

$$CExE_{Insumos} = \sum_i (CExC_{insumo,i} \times Cantidad_i \times \%_{Productores_i}) \quad (IV.9)$$

$$CExC_{Maquinaria} = \sum_i (CExC_{maquinaria,i} \times N_i \times \%_{Productores_i}) \quad (IV.10)$$

$$CExC_{Transp} = \sum_i (CExC_{transp,i} \times Cantidad_i \times \%_{Productores_i}) \quad (IV.11)$$

Cabe apuntar que respecto al $CExC_{Maquinaria}$, las estimaciones se basaron en el $CExC$ del acero (118 MJ kg^{-1}) (Patzek, 2004) y la masa de cada equipo. Esta última se calculó a partir del uso indirecto de energía en la fabricación de maquinaria (por hectárea) previamente estimado y la energía embutida específica reportada para maquinaria agrícola (108 MJ kg^{-1}) (Pimentel, 2004). Para el $CExC_{Transp}$, se consideró la cantidad de combustibles fósiles usada en el transporte y la distribución de los insumos agrícolas y el $CExC$ de los combustibles. En el caso del equipo de riego, la $CExC_{IrrEq}$, en MJ ha^{-1} , se calculó a partir de los insumos materiales necesarios para su fabricación según (Batty y Keller, 1980) y sus correspondientes $CExC$ tomados de (Dewulf y Van Langenhove, 2004; Patzek, 2004; Szargut, 2005).

IV.2.5.2 Consumo directo de exergía

El $CExC$ asociado a cada operación agrícola ($CExC_{Operación}$) se determinó con base en el uso de diésel en la operación agrícola i y el $CExC$ del diésel, de modo que el $CExC$ por hectárea ($CExC_{Operación}$) se determinó mediante la expresión:

$$CExC_{Operaciones} = \sum_i (CExC_{Operación,i} \times N_i \times \%_{Productores_i}) \quad (IV.12)$$

El $CExC$ relacionado con la aplicación de riego ($CExC_{Irr}$) se estimó a partir de las cantidades de diésel y electricidad necesarias para la aplicación del agua de riego y los $CExC$ del diésel y la electricidad (Tabla IV.5). Entonces, el $CExC$ por hectárea se obtuvo de la siguiente manera:

$$CExE_{Total} = CExC_{indirecto} + CExC_{directo} \quad (IV.13)$$

con:

$$CExC_{indirecto} = CExE_{Insumos} + CExC_{Maquinaria} + CExC_{IrrEq} + CExC_{Transp} \quad (IV.14)$$

$$CExE_{directo} = CExC_{Operaciones} + CExC_{Irr} \quad (IV.15)$$

En concordancia con los indicadores energéticos, se computaron los siguientes indicadores: intensidad exérgica (ExI , $CExC$ por hectárea dividido entre el rendimiento de grano por hectárea), cociente exérgica obtenida - exérgica consumida (ExR , equivalente exérgico del grano producido por hectárea dividido entre el $CExC$ por hectárea), y exérgica neta (NEx , equivalente exérgico del grano producido por hectárea menos el $CExC$ por hectárea). El equivalente exérgico del grano se estimó considerando un contenido exérgico de 21.7 MJ kg^{-1} grano (m.s.) (Ptasinski, 2016) y un contenido de humedad del grano de 25% (Pimentel, 2004).

IV.2.6 Estimación de las emisiones de GEI

IV.2.6.1 Emisiones indirectas de GEI

Las emisiones de GEI de la producción de semilla, fertilizantes sintéticos, y pesticidas ($GEI_{Insumos}$) y aquellas de la fabricación de maquinaria agrícola ($GEI_{Maquinaria}$) se determinaron con las ecuaciones siguientes:

$$GEI_{Insumos} = \sum_j [\sum_i (FE_{insumo,i,j} \times Cantidad_i \times \%_{Productores_i})] \times PCM_j \quad (IV.16)$$

$$GEI_{Maquinaria} = \sum_j [\sum_i (FE_{maquinaria,i,j} \times N_i \times \%_{Productores_i})] \times PCM_j \quad (IV.17)$$

Donde FE_{insumo} es el factor de emisión del GEI j asociado al insumo agrícola i , en kg GEI kg⁻¹ ó kg GEI L⁻¹ (Tabla IV.10), y $FE_{maquinaria}$ es el factor de emisión del GEI j asociado al equipo i , en kg GEI ha⁻¹ (Tabla IV.6), y PCM es el potencial de calentamiento mundial del GEI j para convertir a emisiones de CO₂ equivalente (CO₂e, i.e. 1 para CO₂, 298 para N₂O, 25 para CH₄) (IPCC, 2007). Las emisiones de GEI asociadas a la fabricación del equipo de riego (GEI_{IrrEq} , en kg GEI ha⁻¹) fueron tomadas de (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018).

Tabla IV.10. Factores de emisión de gases de efecto invernadero estimados para los insumos agrícolas.

Insumo agrícola	Unidad	[kg CO ₂ unidad ⁻¹]	[kg N ₂ O unidad ⁻¹]	[kg CH ₄ unidad ⁻¹]	Referencia
Semilla mejorada	[kg]	2.2	2.2×10^{-3}	3.8×10^{-2}	Cálculo propio ^c
Semilla criolla ^a	[kg]	nd	nd	nd	-
Cloruro de potasio	[kg]	0.6	7.7×10^{-6}	9.0×10^{-4}	(GREET, 2015)
Nitrato de potasio	[kg]	0.7	2.2×10^{-3}	1.4×10^{-3}	(GREET, 2015)
Fosfato diamónico	[kg]	1.2	1.5×10^{-5}	2.5×10^{-3}	(GREET, 2015)
Fosfato monoamónico	[kg]	1.0	1.5×10^{-5}	2.0×10^{-3}	(GREET, 2015)
Amoniaco anhidro	[kg]	2.3	1.5×10^{-5}	6.6×10^{-3}	(GREET, 2015)
Nitrato de amonio	[kg]	1.2	3.8×10^{-3}	3.2×10^{-3}	(GREET, 2015)
Sulfato de amonio	[kg]	0.6	5.0×10^{-6}	1.7×10^{-3}	(GREET, 2015)
Superfosfato simple	[kg]	0.2	7.8×10^{-6}	6.0×10^{-4}	(Wood y Cowie, 2004)
Superfosfato triple	[kg]	0.6	1.1×10^{-5}	1.1×10^{-3}	(GREET, 2015)
Urea	[kg]	1.0	1.6×10^{-5}	4.8×10^{-3}	(GREET, 2015)
Fórmula NPK	[kg]	0.6	1.8×10^{-3}	6.2×10^{-4}	(Wood y Cowie, 2004)
Insecticidas	[kg]	2.6	3.3×10^{-5}	3.5×10^{-3}	Cálculo propio ^d
	[L]	8.8	1.1×10^{-4}	1.2×10^{-2}	Cálculo propio ^d
Herbicidas	[kg]	13.6	1.6×10^{-4}	1.8×10^{-2}	Cálculo propio ^d
	[L]	6.0	7.1×10^{-5}	8.1×10^{-3}	Cálculo propio ^d
Fungicidas	[kg]	7.9	9.3×10^{-5}	1.1×10^{-2}	Cálculo propio ^d
	[L]	7.2	8.5×10^{-5}	9.7×10^{-3}	Cálculo propio ^d
Rodenticidas	[kg]	15.0	1.8×10^{-4}	2.0×10^{-2}	Cálculo propio ^d
Maquinaria agrícola	[GJ] ^b	89.6	1.2×10^{-3}	1.1×10^{-1}	Cálculo propio ^e
Diésel	[L]	3.0	1.0×10^{-3}	2.6×10^{-3}	(GREET, 2015; IPCC, 2006) ^f
Combustóleo marítimo	[L]	3.5	2.9×10^{-5}	2.5×10^{-3}	(GREET, 2015; IPCC, 2006) ^f
Queroseno	[L]	2.6	6.8×10^{-5}	1.9×10^{-3}	(GREET, 2015; IPCC, 2006) ^f
Electricidad	[kWh]	0.6	4.4×10^{-6}	8.8×10^{-4}	Cálculo propio ^g

nd, no disponible. ^a También llamada semilla nativa o local. ^b Por GJ de energía usada en la fabricación de maquinaria agrícola. ^c Calculadas a partir de las emisiones de GEI totales ($3.8 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de semilla) según (Camargo et al., 2013), la mezcla de combustibles para la producción de semilla según (West y Marland, 2002), y los factores de emisión por defecto de (IPCC, 2006). ^d Calculadas a partir de las emisiones de totales por unidad de energía utilizada en la fabricación de pesticidas ($6.9 \times 10^{-2} \text{ kg CO}_2\text{e MJ}^{-1}$) según (Audsley, Stacey, Parsons, y Williams, 2009) y la composición CO₂ : N₂O : CH₄ de las emisiones totales de GEI de la fabricación de herbicidas e insecticidas según (GREET, 2015). ^e Calculadas a partir de la mezcla de combustibles para la fabricación, el transporte y la reparación de maquinaria agrícola según (West y Marland, 2002) y los factores de emisión por defecto de (IPCC, 2006); las emisiones de GEI de la fabricación de equipo para riego se tomaron de (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). ^f Incluye las emisiones del procesamiento *aguas arriba* de los combustibles y las emisiones *in situ* del uso de los combustibles. ^g Calculadas a partir del consumo de combustibles fósiles para la generación de electricidad estimado en base a la mezcla de energéticos anual promedio para el periodo 2004 – 2008 derivada de (SIE, 2017b) y los factores de emisión correspondientes, incluyendo las emisiones del procesamiento *aguas arriba* de los combustibles según (GREET, 2015) y las emisiones *in situ* del uso de los combustibles, estas últimas calculadas empleando los factores de emisión de (INECC, 2014; IPCC, 2006).

Tabla IV.11. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) estimadas para el uso de combustibles fósiles en el transporte y distribución de insumos agrícolas.

Insumo agrícola	Participación de las importaciones en el CNA ^c [%]	Transporte de importaciones ^d			Transporte interno			Distribución interna		
		[kg CO ₂ ton ⁻¹]	[kg N ₂ O ton ⁻¹]	[kg CH ₄ ton ⁻¹]	[kg CO ₂ ton ⁻¹]	[kg N ₂ O ton ⁻¹]	[kg CH ₄ ton ⁻¹]	[kg CO ₂ ton ⁻¹]	[kg N ₂ O ton ⁻¹]	[kg CH ₄ ton ⁻¹]
Semilla mejorada	7.0	1.8	1.6×10^{-5}	1.4×10^{-3}	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Semilla criolla ^a	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cloruro de potasio	100.0	19.0	1.7×10^{-4}	1.4×10^{-2}	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Nitrato de potasio	100.0	37.9	3.4×10^{-4}	3.0×10^{-2}	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Fosfato diamónico	100.0	7.3	6.3×10^{-5}	5.4×10^{-3}	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Fosfato monoamónico	100.0	15.5	1.4×10^{-4}	1.2×10^{-2}	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Amoníaco anhidro	0.0	-	-	-	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Nitrato de amonio	78.5	32.4	2.8×10^{-4}	2.4×10^{-2}	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Sulfato de amonio	4.0	1.2	1.0×10^{-5}	8.9×10^{-4}	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Superfosfato simple	0.0	-	-	-	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Superfosfato triple	0.0	-	-	-	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Urea	100.0	33.3	2.9×10^{-4}	2.4×10^{-2}	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Fórmula NPK	100.0	38.4	3.3×10^{-4}	2.8×10^{-2}	29.7	2.7×10^{-4}	2.5×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Insecticidas ^b	56.1	133.3	3.2×10^{-3}	1.0×10^{-1}	28.8	2.6×10^{-4}	2.4×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Herbicidas ^b	57.4	32.4	5.5×10^{-4}	2.5×10^{-2}	28.8	2.6×10^{-4}	2.4×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Fungicidas ^b	86.6	391.7	10.0×10^{-3}	3.0×10^{-1}	28.8	2.6×10^{-4}	2.4×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}
Rodenticidas	58.7	26.1	3.8×10^{-4}	2.0×10^{-2}	28.8	2.6×10^{-4}	2.4×10^{-2}	4.6	4.2×10^{-5}	3.8×10^{-3}

^a También llamada semilla nativa o local, los productores que utilizan este tipo de semilla generalmente la obtienen de cosechas anteriores, por lo que no se requiere transporte y distribución de la semilla. ^b Los valores por L de producto fueron estimados utilizando las densidades típicas (en kg L⁻¹) de insecticidas, herbicidas y fungicidas. ^c CNA, Consumo Nacional Aparente calculado como producción nacional más importaciones menos exportaciones; promedio anual estimado para el periodo 2004 - 2008. ^d Promedio ponderado según la participación de las importaciones en el CNA (véase la sección 2.6 para mayores detalles).

La cantidad de combustibles fósiles usada en el transporte y la distribución de los insumos agrícolas, así como los correspondientes factores de emisión de los combustibles según (INECC, 2014; IPCC, 2006) se emplearon para calcular un factor de emisión para el transporte y la distribución de los insumos agrícolas, FE_{transp} en kg GEI kg⁻¹ ó kg GEI L⁻¹, del GEI j y el insumo i (**Tabla IV.11**).

Este FE_{transp} se usó para determinar las emisiones de GEI totales por hectárea debidas al transporte y la distribución de los insumos (GEI_{Transp}):

$$GEI_{Transp} = \sum_j [\sum_i (FE_{transp,i,j} \times Cantidad_i \times \%_{Productores_i})] \times PCM_j \quad (IV.18)$$

Las emisiones de GEI del consumo de combustibles fósiles en la generación de la electricidad para el riego ($GEI_{Irr-elect}$, en kg GEI ha⁻¹) se estimaron a partir de la eficiencia de generación y la mezcla de combustibles promedio anual para 2004 – 2008, ambas calculadas con datos de (SIE, 2017b). Obsérvese que las $GEI_{Irr-elect}$ incluyeron las emisiones de GEI *agua arriba* del procesamiento de los combustibles fósiles, conforme a los valores de (GREET, 2015).

IV.2.6.2 Emisiones directas de GEI

Las emisiones de GEI por el consumo de diésel en las operaciones agrícolas mecanizadas por hectárea cultivada ($GEI_{Operaciones}$) se computaron con la ecuación:

$$GEI_{Operaciones} = \sum_j [\sum_i (D_i \times FE_{diésel,j} \times N_i \times \%_{Productores_i})] \times PCM_j \quad (IV.19)$$

Donde D es la energía del diésel usado en la operación i por hectárea y $FE_{diésel}$ es el factor de emisión del diésel para el GEI j en kg GEI MJ⁻¹. Nótese que este último incluyó las emisiones de GEI *aguas arriba* en el procesamiento del diésel, conforme a los valores de (GREET, 2015). No se contabilizaron emisiones de GEI en las operaciones agrícolas manuales o con animales de tiro. Las emisiones de GEI del consumo de diésel para la aplicación de riego ($GEI_{Irr-diésel}$, en kg GEI ha⁻¹) se obtuvieron de (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). Las emisiones de GEI por el uso de fertilizantes sintéticos incluyeron las emisiones directas de N₂O por la aplicación de fertilizantes nitrogenados y las emisiones de CO₂ por la aplicación de urea, ambas calculadas con la siguiente expresión:

$$GEI_{Fert} = \sum_j [\sum_i (FE_{fert,i,j} \times f_j \times Cantidad_i \times \%_{Productores_i})] \times PCM_j \quad (IV.20)$$

En la cual, FE_{fert} es el factor de emisión del GEI j para el fertilizante i igual a 0.01 kg N₂O-N kg N⁻¹ aplicado y 0.20 kg CO₂-C kg⁻¹ urea aplicado, que corresponden a los factores de emisión por defecto de (IPCC, 2006) y f es el factor de conversión para transformar las emisiones de N₂O-N en N₂O (44/12) y de CO₂-C en CO₂ (44/12). Así entonces, las emisiones totales de GEI por hectárea fueron calculadas como se indica a continuación:

$$GEI_{Total} = GEI_{indirectas} + GEI_{directas} \quad (IV.21)$$

Con:

$$GEI_{indirectas} = GEI_{Insumos} + GEI_{Maquinaria} + GEI_{IrrEq} + GEI_{Transp} + GEI_{Irr-elect} \quad (IV.22)$$

$$GEI_{directas} = GEI_{Operaciones} + GEI_{Irr-diésel} + GEI_{Fert} \quad (IV.23)$$

Adicionalmente, se calcularon los siguientes indicadores: intensidad de emisiones de GEI (GEI_i , emisiones totales de GEI por hectárea divididas entre el rendimiento de grano por hectárea) y las emisiones de GEI por unidad de energía usada (GEI_e , emisiones de GEI totales por hectárea divididas entre el uso total de energía por hectárea).

IV.2.7 Análisis de incertidumbre

Conforme al procedimiento expuesto en (Taylor, 1997), la incertidumbre (u_x) en los valores promedios estimados se calculó como el error estándar de la media:

$$u_x = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (IV.24)$$

Donde $\bar{x}$ es la media de los n valores de la variable x . La incertidumbre se obtuvo para los promedios calculados de cada uno de los insumos energéticos y exergéticos y las fuentes de emisiones de GEI considerados en el presente análisis. Para estimar la incertidumbre en los indicadores arriba mencionados, se utilizó la fórmula general para la propagación de errores (Taylor, 1997):

$$u_q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} u_x\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial z} u_z\right)^2} \quad (IV.25)$$

Donde q es una función de las variables $x, \dots, z$. Dado que los indicadores seleccionados sólo involucran operaciones de adición/sustracción y multiplicación/división de las variables de uso de energía, $CExC$, y emisiones de GEI, la **Ec. (IV.25)** se reduce a (Currell, 2015; Taylor, 1997):

$$u_q = \sqrt{u_x^2 + \dots + u_z^2} \quad (IV.26)$$

para determinar la incertidumbre absoluta en la adición/sustracción de variables, y:

$$u\%_q = \sqrt{u\%_x^2 + \dots + u\%_z^2} \quad (IV.27)$$

para calcular la incertidumbre relativa ($u\%$) en la multiplicación/división de variables, con:

$$u\%_q = \frac{u_q}{q} \times 100 \quad (IV.28)$$

IV.2.8 Estimaciones a nivel nacional

Los promedios calculados de uso de energía, $CExC$, y emisiones de GEI por hectárea sembrada para cada sistema de producción de maíz fueron utilizados para estimar el uso de energía, $CExC$ y emisiones de GEI del cultivo del maíz grano a escala nacional. Para ello, se empleó además la superficie sembrada bajo cada sistema de producción de maíz derivada de los microdatos del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007, el último disponible (SNIEG, 2016). Los detalles sobre las variables seleccionadas de los microdatos, el método de estimación, y las suposiciones consideradas

se encuentran en (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). Cabe apuntar que, debido a limitaciones en los microdatos del Censo, la superficie estimada de maíz grano comprende sólo las unidades de producción que sembraron exclusivamente maíz grano, es decir, corresponde a la superficie de maíz en monocultivo (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018).

IV.3 Resultados

IV.3.1 Uso de energía

El rango y el promedio de los estimados de uso total de energía por hectárea, participación del usos directos e indirectos de energía, EI, NE y ER se presentan en la **Tabla IV.12**. Las cifras por entidad federativa se muestran en la **Tabla IV.13** y la contribución de los distintos insumos energéticos se aprecia en la **Figura IV.2**.

Los resultados sugieren que el diésel para las operaciones agrícolas es el principal insumo energético en los sistemas de producción TCS y TMS, representando aproximadamente 55% y 47%, respectivamente, del uso total de energía promedio por hectárea (**Figura IV.3**). La mayor parte del uso de energía restante correspondió a maquinaria agrícola (13% y 12%, respectivamente), pesticidas (12% y 14%), semilla (11% y 22%), y trabajo humano y animal (7% y 5%). En consecuencia, los usos directos de energía concentraron la mayor proporción del uso total de energía promedio en los sistemas de producción TCS y TMS. Respecto a los sistemas de producción TCF y TMF, los fertilizantes sintéticos fueron el insumo energético dominante contribuyendo con cerca de 65% y 63%, respectivamente, del uso total de energía por hectárea promedio, seguidos del diésel (13% y 14%), pesticidas (8% y 6%), y semilla (3% y 9%). Por lo tanto, los usos indirectos de energía constituyeron la mayor fracción del uso total de energía promedio en los sistemas de producción TCF y TMF.

En los sistemas de producción de maíz con riego, el uso total promedio de energía por hectárea se calculó usando el promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) del uso de energía para riego en lugar los valores computados para las distintas entidades federativas. La razón de este cambio fue la consideración de que al usar el promedio nacional ponderado se incrementaría la representatividad de las estimaciones pues las cifras estatales podrían no ser representativas dado que (i) los insumos relacionados con el riego varían mucho entre las localidades debido principalmente a condiciones climáticas heterogéneas y (ii) la superficie de maíz bajo riego se concentra en un número reducido de estados (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). Los promedios nacionales ponderados de los insumos energéticos para el riego de los diferentes sistemas de producción de maíz se obtuvieron de (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). De esta manera, en el sistema de producción GCF la mayor parte del uso de energía se debió a los fertilizantes sintéticos, con casi 42% del uso total de energía promedio por hectárea en el ciclo PV y 40% de aquel en el ciclo OI, y la electricidad y diésel para riego, con 32% y 42%, respectivamente, seguidos de los pesticidas (10% y 6%), y el diésel para operaciones agrícolas (8% y 7%). En el caso del sistema de producción GMF, los principales insumos energéticos fueron los fertilizantes sintéticos, con casi 57% del uso total de energía promedio por hectárea en el ciclo PV y 65% de aquel en el ciclo OI, la electricidad y el diésel para el riego, con 16% y 6%, respectivamente, y el diésel para las operaciones agrícolas, con 12% y 14%. Por lo tanto, en los sistemas de producción GCF y GMF los usos indirectos de energía dominaron en el uso total de energía promedio por hectárea.

Tabla IV.12. Rango y promedio de los valores estimados del uso total de energía por hectárea, participación de los usos directos e indirectos de energía, intensidad energética (*EI*), energía neta (*NE*) y cociente energía obtenida – energía usada (*ER*) de los sistemas de producción de maíz seleccionados.

Sistema de producción ^a	Ciclo ^b	Uso total de energía		Energía directa ^e		Energía indirecta ^e		<i>EI</i>		<i>NE</i>		<i>ER</i>	
		[GJ ha ⁻¹]		[%]		[%]		[GJ Mg ⁻¹ de grano]		[GJ ha ⁻¹]			
		Rango ^c	Media (DE) ^d	Rango	Media ^f	Rango	Media ^f	Rango	Media (DE) ^d	Rango	Media (DE) ^d	Rango	Media (DE) ^d
TCS	PV	1.38 - 3.70	2.35 (0.93)	46 – 77	63	23 – 54	37	0.50 - 3.42	1.75 (1.12)	11.12 - 36.36	20.57 (10.81)	4.01 - 27.29	12.03 (8.96)
TMS	PV	3.02 - 4.32	3.75 (0.66)	46 – 58	52	42 – 54	48	2.02 - 2.88	2.58 (0.49)	15.04 - 17.56	16.29 (1.26)	4.76 - 6.81	5.48 (1.16)
TCF	PV	5.83 - 14.89	9.32 (3.56)	11 – 39	18	61 – 89	82	2.11 - 6.54	4.24 (1.71)	13.89 - 32.52	22.12 (7.87)	2.10 - 6.50	3.81 (1.67)
TMF	PV	4.51 - 26.60	10.75 (5.90)	7 – 33	16	67 – 93	84	2.14 - 7.39	3.95 (1.64)	8.53 - 51.82	28.23 (12.96)	1.86 - 6.42	4.07 (1.63)
GCF	PV	3.77 - 20.76	13.61 (6.16)	14 – 43	42	57 – 86	58	0.94 - 4.28	3.58 (1.44)	29.72 - 51.13	39.69 (12.39)	3.21 - 14.55	4.45 (2.29)
	OI	-	15.44	-	50	-	50	-	5.15	-	25.74	-	2.67
GMF	PV	10.35 - 48.57	19.08 (5.78)	7 – 62	28	38 – 93	72	1.53 - 6.12	2.92 (1.04)	43.97 - 92.41	73.14 (16.04)	2.24 - 8.97	5.45 (2.50)
	OI	10.83 - 42.27	16.42 (3.95)	13 – 73	21	27 – 87	79	2.06 - 12.69	3.22 (0.75)	3.44 - 106.75	57.07 (23.77)	1.08 - 6.67	4.49 (1.16)
BMF	PV	22.75 - 63.58	40.23 (3.78)	42 – 80	60	20 – 58	40	4.12 - 7.61	6.35 (1.71)	32.15 - 85.95	52.78 (25.57)	1.80 - 3.33	2.30 (0.61)
	OI	22.57 - 45.94	40.20 (2.47)	57 – 86	82	14 – 43	18	5.05 - 7.32	8.45 (1.84)	32.33 - 40.25	27.41 (16.55)	1.88 - 2.72	1.68 (0.42)

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c Mínimo y máximo de los valores estimados. ^d Promedio simple y (desviación estándar) de los valores estatales del uso total de energía por hectárea excepto para los sistemas de producción con riego, en los cuales se utilizó el promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) de los insumos energéticos para riego en lugar de los valores estatales de los insumos energéticos para riego. ^e Comprende trabajo humano y animal, diésel para operaciones agrícolas, electricidad y diésel para aplicación de riego. ^f Porcentajes en el uso total de energía promedio por hectárea. ^g Comprende fabricación de maquinaria agrícola, equipo de riego, semilla, fertilizantes sintéticos y pesticidas, así como combustibles fósiles utilizados en el transporte y la distribución de los insumos agrícolas.

Tabla IV.13. Estimados del uso total de energía por hectárea, intensidad energética (*EI*), energía neta (*NE*), cociente energía obtenida – energía usada (*ER*) para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible en (SIAP, 2008).

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción ^b	Estado	Rendimiento ^c [kg ha ⁻¹]	Uso total de energía ^d [MJ ha ⁻¹]	<i>EI</i> [MJ kg ⁻¹ de grano]	<i>NE</i> [MJ ha ⁻¹]	<i>ER</i>
TCS	PV	Nuevo León	1,000.0	1,770.0	1.8	11,960.0	7.8
		Guanajuato	2,440.0	1,870.0	0.8	31,620.0	17.9
		San Luis Potosí	1,500.0	2,060.0	1.4	18,530.0	10.0
		Guerrero	2,750.0	1,380.0	0.5	36,360.0	27.3
		Oaxaca	1,080.0	3,700.0	3.4	11,120.0	4.0
TMS	PV	Tabasco	1,250.0	3,310.0	2.6	13,840.0	5.2
		Aguascalientes	1,500.0	3,020.0	2.0	17,560.0	6.8
		Oaxaca	1,500.0	4,320.0	2.9	16,260.0	4.8
		Tabasco	1,380.0	3,900.0	2.8	15,040.0	4.8
TCF	PV	Chihuahua	1,500.0	5,830.0	3.9	14,760.0	3.5
		Guanajuato	2,800.0	5,910.0	2.1	32,520.0	6.5
		Michoacán	2,410.0	14,890.0	6.2	18,180.0	2.2
		México	2,800.0	7,590.0	2.7	30,840.0	5.1
		Guerrero	2,670.0	6,610.0	2.5	30,030.0	5.5
TMF	PV	Tlaxcala	2,400.0	11,270.0	4.7	21,670.0	2.9
		Oaxaca	1,650.0	8,760.0	5.3	13,890.0	2.6
		Veracruz	2,100.0	13,730.0	6.5	15,090.0	2.1
		Chihuahua	1,500.0	7,920.0	5.3	12,670.0	2.6
		Durango	950.0	4,510.0	4.7	8,530.0	2.9
		Aguascalientes	2,500.0	5,970.0	2.4	28,340.0	5.7
		Guanajuato	4,500.0	9,940.0	2.2	51,820.0	6.2
		Jalisco	5,000.0	18,280.0	3.7	50,350.0	3.7
		Michoacán	2,590.0	14,800.0	5.7	20,750.0	2.4
		México	2,500.0	10,460.0	4.2	23,850.0	3.3
		Guerrero	3,700.0	10,110.0	2.7	40,670.0	5.0
		Morelos	3,600.0	26,600.0	7.4	22,810.0	1.9
		Tlaxcala	2,700.0	12,040.0	4.5	25,020.0	3.1
		Chiapas	2,400.0	5,130.0	2.1	27,810.0	6.4
		Oaxaca	3,000.0	8,010.0	2.7	33,170.0	5.1
GCF	PV	Tabasco	1,820.0	9,960.0	5.5	15,020.0	2.5
		Yucatán	3,000.0	6,740.0	2.2	34,430.0	6.1
		Nuevo León	4,000.0	3,770.0	0.9	51,130.0	14.5
		Michoacán	4,850.0	20,760.0	4.3	45,800.0	3.2
		Guerrero	2,800.0	8,710.0	3.1	29,720.0	4.4
GMF	PV	Guerrero	3,000.0	9,010.0	3.0	32,160.0	4.6
		Sinaloa	7,000.0	14,030.0	2.0	82,050.0	6.8
		Chihuahua	8,080.0	48,570.0	6.0	62,320.0	2.3
		Durango	6,760.0	10,350.0	1.5	82,440.0	9.0
		Aguascalientes	5,780.0	35,360.0	6.1	43,970.0	2.2
		Guanajuato	8,000.0	17,390.0	2.2	92,410.0	6.3
		Jalisco	7,000.0	19,880.0	2.8	76,200.0	4.8
		Michoacán	5,380.0	21,570.0	4.0	52,270.0	3.4
		Guerrero	5,750.0	21,190.0	3.7	57,730.0	3.7
	OI	Sonora	6,300.0	23,600.0	3.7	62,870.0	3.7
		Sinaloa	9,150.0	18,840.0	2.1	106,750.0	6.7
		Nuevo León	4,200.0	13,330.0	3.2	44,310.0	4.3
		Tamaulipas	5,000.0	10,830.0	2.2	57,790.0	6.3
		Colima	5,000.0	16,770.0	3.3	51,860.0	4.1
	PV	Michoacán	3,330.0	42,270.0	12.7	3,440.0	1.1
		Guerrero	4,500.0	13,960.0	3.1	47,810.0	4.4
		Chihuahua	8,500.0	63,570.0	7.5	53,090.0	1.8
		Nuevo León	8,000.0	32,950.0	4.1	76,850.0	3.3
		Aguascalientes	5,780.0	43,960.0	7.6	35,370.0	1.8
BMF	PV	Guanajuato	9,000.0	37,570.0	4.2	86,000.0	3.3
		Michoacán	5,380.0	32,590.0	6.1	41,250.0	2.3
		Tlaxcala	4,000.0	22,750.0	5.7	32,150.0	2.4
	OI	Baja California Sur	6,280.0	45,940.0	7.3	40,250.0	1.9
		Tamaulipas	4,500.0	22,750.0	5.0	39,020.0	2.7
		Guerrero	4,000.0	22,570.0	5.6	32,330.0	2.4

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c Rendimiento de producción de grano, tomado de (SIAP, 2008). ^d En los sistemas de producción con riego, el uso total de energía se calculó utilizando las cifras estatales del uso de energía para riego de (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018).

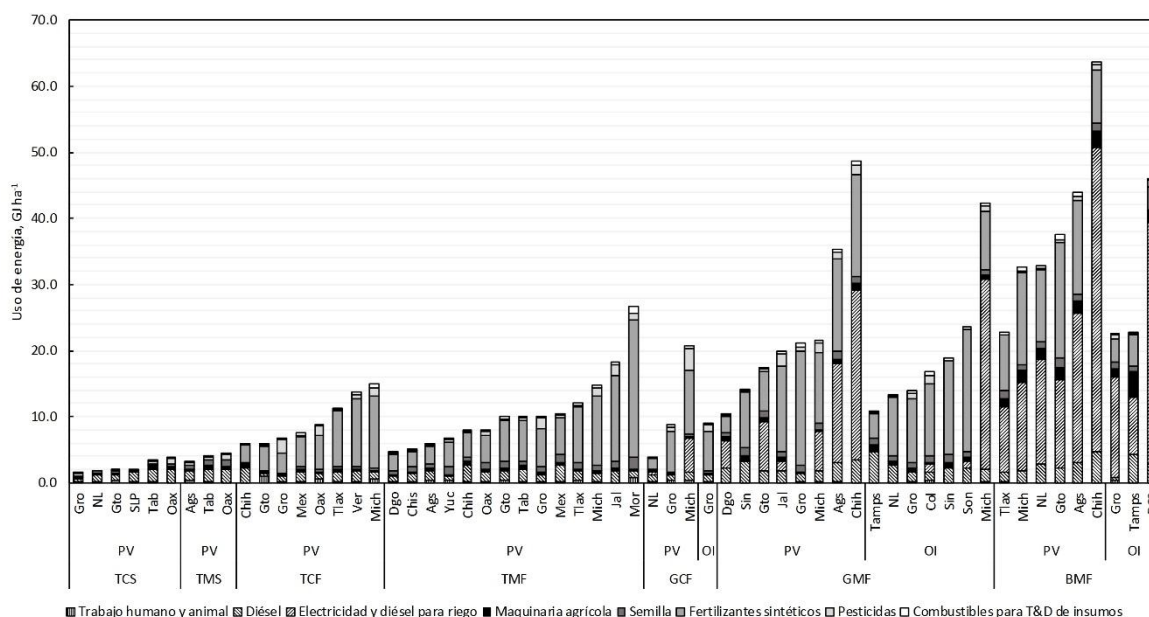


Figura IV.2. Uso total de energía por hectárea estimado para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible en (SIAP, 2008). PV, ciclo de producción primavera – verano; OI, ciclo de producción otoño – invierno; T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos; T&D, transporte y distribución. Maquinaria agrícola incluye equipo para riego. Las barras con patrones de línea representan los usos directos de energía. Las barras en colores sólidos representan los usos indirectos de energía.

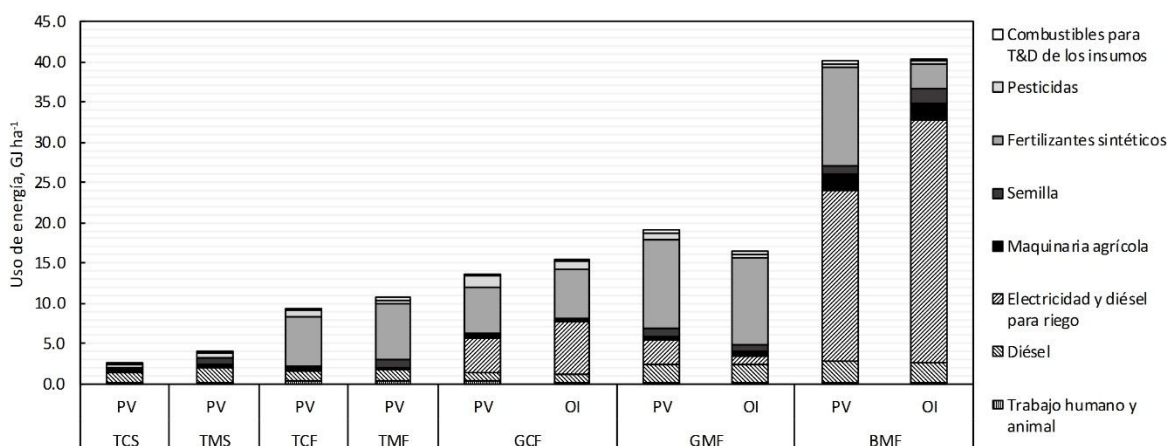


Figura IV.3. Uso total promedio de energía por hectárea estimado para los sistemas de producción de maíz seleccionados y contribución de los distintos insumos energéticos. PV, ciclo de producción primavera – verano; OI, ciclo de producción otoño – invierno; T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos; T&D, transporte y distribución. Maquinaria agrícola incluye equipo para riego. Las barras con patrones de línea representan los usos directos de energía. Las barras en colores sólidos representan los usos indirectos de energía.

Respecto al sistema de producción BMF, la electricidad y el diésel para la aplicación de riego fueron el principal insumo energético, representando alrededor de 53% y 73% del uso total promedio de energía en los ciclos PV y OI, respectivamente, seguidos de los fertilizantes sintéticos (30% y 8%) y el diésel para las labores agrícolas (7% y 6%). Entonces, los usos directos de energía constituyeron la mayor fracción del uso total de energía en ambos ciclos de producción.

IV.3.2 Consumo acumulado de exergía

El rango y el promedio de los estimados del *CExC* por hectárea, contribución de los consumos directos e indirectos de exergía, *ExI*, *NEx*, y *ExR* se encuentran en la **Tabla IV.14**. Los valores calculados por entidad federativa se muestran en la **Tabla IV.15** y la contribución relativa de los diferentes insumos exergéticos en los totales por hectárea se ilustra en la **Figura IV.4**.

Según las cifras obtenidas, en los sistemas de producción TCS y TMS, el diésel para las operaciones agrícolas fue el mayor insumo exergético, representando alrededor de 54% y 43%, respectivamente, del *CExC* promedio por hectárea, seguido de los pesticidas (19% y 21%), la maquinaria agrícola (14% y 12%), y la semilla (13% y 23%) (**Figura IV.5**). Entonces, los consumos directos de exergía en conjunto concentraron la mayor parte del *CExC* por hectárea del sistema de producción TCS mientras que los consumos indirectos hicieron lo propio en el sistema de producción TMS. Respecto a los sistemas de producción TCF y TMF, los fertilizantes sintéticos fueron el principal insumo exergético, aportaron alrededor de 72% y 69%, respectivamente, del *CExC* promedio por hectárea, seguidos del diésel para operaciones agrícolas (10% y 11%), los pesticidas (9% y 7%), la semilla (3% y 8%), y la maquinaria agrícola (2% y 3%). Por lo tanto, los consumos indirectos de exergía constituyeron la mayor parte del *CExC* total por hectárea estimado para los sistemas de producción TCF y TMF.

Como se hizo para el análisis energético, el *CExC* promedio por hectárea de los sistemas de producción de maíz con riego se calculó usando el promedio nacional ponderado de los requerimientos de electricidad y diésel para riego. De esta manera, en el sistema de producción GCF los fertilizantes sintéticos representaron el principal insumo exergético, constituyendo cerca de 48% del *CExC* promedio por hectárea calculado para el ciclo PV y 47% de aquel para el ciclo OI, seguidos de la electricidad y el diésel para riego (32% y 40%, respectivamente), los pesticidas (8% y 4%), y el diésel para las operaciones agrícolas (7% y 5%). Los fertilizantes sintéticos también fueron el insumo exergético dominante en el sistema de producción GMF, aportando alrededor de 58% del *CExC* promedio por hectárea estimado para el ciclo PV y 70% de aquel para el ciclo OI, por delante de la electricidad y el diésel para riego (17% y 6%, respectivamente), y el diésel para las operaciones agrícolas (10% y 12%). En conjunto, los consumos indirectos de exergía concentraron la mayor proporción del *CExC* por hectárea calculado para los sistemas de producción GCF y GMF en ambos ciclos de producción.

En el caso del sistema de producción BMF, la electricidad y el diésel para riego representaron el mayor insumo exergético, con una aportación equivalente a cerca de 51% del *CExC* promedio por hectárea computado para el ciclo PV y 74% de aquel para el ciclo OI, seguido de los fertilizantes sintéticos (32% y 9%, respectivamente), la maquinaria agrícola y el equipo de riego (5% y 6%), y el diésel para las operaciones agrícolas (5% y 4%). Por lo tanto, los consumos directos de exergía acapararon la mayor parte del *CExC* por hectárea calculado para el sistema de producción BMF, tanto en el ciclo PV como en el ciclo OI.

Tabla IV.14. Rango y promedio de los valores estimados del consumo acumulado de exergía (*CExC*) por hectárea, participación de los consumos directos e indirectos de exergía, intensidad exérgica (*ExI*), exergía neta (*NEx*), y cociente exergía obtenida – exergía consumida (*ExR*) de los sistemas de producción de maíz seleccionados.

Sistema de producción ^a	Ciclo ^b	<i>CExC</i>		Exergía directa ^e		Exergía indirecta ^e		<i>ExI</i>		<i>NEx</i>		<i>ExR</i>	
		[GJ ha ⁻¹]		[%]		[%]		[GJ Mg ⁻¹ de grano]		[GJ ha ⁻¹]			
		Rango ^c	Media (DE) ^d	Rango	Media ^f	Rango	Media ^f	Rango	Media (DE) ^d	Rango	Media (DE) ^d	Rango	Media (DE) ^d
TCS	PV	1.48 - 4.17	2.46 (1.14)	32 – 72	54	28 – 68	46	0.54 - 3.86	1.85 (1.30)	13.40 - 43.27	24.72 (12.81)	4.21 - 30.12	14.08 (10.25)
TMS	PV	3.14 - 4.89	4.12 (0.89)	41 – 46	43	54 – 59	57	2.09 - 3.26	2.83 (0.64)	18.12 - 21.27	19.64 (1.58)	5.00 - 7.77	5.98 (1.56)
TCF	PV	6.34 - 19.52	11.86 (4.29)	5 – 36	11	64 – 95	89	3.28 - 8.12	5.30 (1.89)	16.58 - 36.20	25.43 (8.49)	2.00 - 4.96	3.43 (1.19)
TMF	PV	5.16 - 30.24	13.51 (6.52)	4 – 29	11	71 – 96	89	2.64 - 8.40	4.94 (1.71)	10.30 - 60.53	32.71 (15.08)	1.94 - 6.17	3.69 (1.30)
GCF	PV	4.30 - 24.93	16.85 (7.37)	7 – 39	39	61 – 93	61	1.08 - 5.14	4.48 (1.96)	33.75 - 60.80	46.35 (15.62)	3.17 - 15.13	4.31 (2.36)
	OI	-	20.45	-	45	-	55	-	6.82	-	28.38	-	2.39
GMF	PV	12.19 - 57.99	22.51 (7.01)	4 – 62	27	38 – 96	73	1.80 - 7.18	3.46 (1.30)	52.63 - 109.93	86.84 (19.59)	2.27 - 9.03	5.53 (2.62)
	OI	13.21 - 53.47	20.80 (4.71)	9 – 71	17	29 – 91	83	2.38 - 16.06	4.13 (1.14)	0.73 - 127.10	66.34 (29.19)	1.01 - 6.82	4.25 (1.34)
BMF	PV	29.07 - 80.00	52.13 (6.57)	35 – 78	56	22 – 65	44	5.54 - 9.41	8.17 (2.04)	36.03 - 92.58	58.16 (28.78)	1.73 - 2.94	2.10 (0.53)
	OI	26.91 - 57.66	50.81 (2.85)	57 – 84	80	16 - 43	20	5.98 - 9.18	10.71 (2.45)	34.70 - 46.33	29.37 (20.27)	1.77 - 2.72	1.58 (0.42)

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c Mínimo y máximo de los valores estimados. ^d Promedio simple y (desviación estándar) de los valores estatales del *CExC* por hectárea excepto para los sistemas de producción con riego, en los cuales se utilizó el promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) de los insumos energéticos para riego en lugar de los valores estatales de los insumos energéticos para riego. ^e Comprende diésel para operaciones agrícolas, electricidad y diésel para aplicación de riego. ^f Porcentajes en el *CExC* promedio por hectárea. ^g Comprende fabricación de maquinaria agrícola, equipo de riego, semilla, fertilizantes sintéticos y pesticidas, así como combustibles fósiles utilizados en el transporte y la distribución de los insumos agrícolas.

Tabla IV.15. Estimados del consumo acumulado de exergía (*CExC*) por hectárea, intensidad exergética (*ExI*), exergía neta (*NEx*), y cociente exergía obtenida – exergía consumida (*ExR*) para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible en (SIAP, 2008).

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción ^b	Estado	<i>CExC</i> ^c [MJ ha ⁻¹]	<i>ExI</i> [MJ kg ⁻¹ grain]	<i>NEx</i> [MJ ha ⁻¹]	<i>ExR</i>
TCS	PV	Nuevo León	1,780.0	1.8	14,490.0	9.1
		Guanajuato	1,760.0	0.7	37,960.0	22.6
		San Luis Potosí	1,910.0	1.3	22,500.0	12.8
		Guerrero	1,490.0	0.5	43,270.0	30.1
		Oaxaca	4,170.0	3.9	13,400.0	4.2
TMS	PV	Tabasco	3,630.0	2.9	16,720.0	5.6
		Aguascalientes	3,140.0	2.1	21,270.0	7.8
		Oaxaca	4,890.0	3.3	19,530.0	5.0
		Tabasco	4,340.0	3.1	18,120.0	5.2
TCF	PV	Chihuahua	6,340.0	4.2	18,070.0	3.8
		Guanajuato	10,830.0	3.9	34,740.0	4.2
		Michoacán	19,570.0	8.1	19,650.0	2.0
		México	9,370.0	3.3	36,200.0	4.9
		Guerrero	8,770.0	3.3	34,690.0	5.0
TMF	PV	Tlaxcala	13,910.0	5.8	25,150.0	2.8
		Oaxaca	10,280.0	6.2	16,580.0	2.6
		Veracruz	15,800.0	7.5	18,380.0	2.2
		Chihuahua	8,900.0	5.9	15,510.0	2.7
		Durango	5,160.0	5.4	10,300.0	3.0
		Aguascalientes	10,800.0	4.3	29,890.0	3.8
		Guanajuato	12,710.0	2.8	60,530.0	5.8
		Jalisco	21,840.0	4.4	59,530.0	3.7
		Michoacán	18,980.0	7.3	23,170.0	2.2
		México	13,530.0	5.4	27,160.0	3.0
		Guerrero	14,140.0	3.8	46,080.0	4.3
		Morelos	30,240.0	8.4	28,350.0	1.9
		Tlaxcala	14,750.0	5.5	29,200.0	3.0
		Chiapas	8,490.0	3.5	30,570.0	4.6
		Oaxaca	9,990.0	3.3	38,840.0	4.9
		Tabasco	11,670.0	6.4	17,950.0	2.5
		Yucatán	7,910.0	2.6	40,910.0	6.2
GCF	PV	Nuevo León	4,300.0	1.1	60,800.0	15.1
		Michoacán	24,930.0	5.1	54,000.0	3.2
		Guerrero	11,820.0	4.2	33,750.0	3.8
GMF	PV	Guerrero	12,400.0	4.1	36,420.0	3.9
		Sinaloa	15,620.0	2.2	98,300.0	7.3
		Chihuahua	57,990.0	7.2	73,520.0	2.3
		Durango	12,190.0	1.8	97,830.0	9.0
		Aguascalientes	41,440.0	7.2	52,630.0	2.3
		Guanajuato	20,270.0	2.5	109,930.0	6.4
		Jalisco	23,840.0	3.4	90,080.0	4.8
		Michoacán	26,790.0	5.0	60,770.0	3.3
		Guerrero	26,610.0	4.6	66,970.0	3.5
	OI	Sonora	26,630.0	4.2	75,900.0	3.8
		Sinaloa	21,820.0	2.4	127,100.0	6.8
		Nuevo León	15,090.0	3.6	53,260.0	4.5
		Tamaulipas	13,210.0	2.6	68,170.0	6.2
		Colima	26,580.0	5.3	54,800.0	3.1
		Michoacán	53,470.0	16.1	730.0	1.0
		Guerrero	19,660.0	4.4	53,580.0	3.7
BMF	PV	Chihuahua	80,000.0	9.4	58,340.0	1.7
		Nuevo León	44,300.0	5.5	85,900.0	2.9
		Aguascalientes	53,000.0	9.2	41,070.0	1.8
		Guanajuato	53,900.0	6.0	92,580.0	2.7
		Michoacán	42,540.0	7.9	45,020.0	2.1
		Tlaxcala	29,070.0	7.3	36,030.0	2.2
		Baja California Sur	57,660.0	9.2	44,550.0	1.8
	OI	Tamaulipas	26,910.0	6.0	46,330.0	2.7
		Guerrero	30,400.0	7.6	34,700.0	2.1

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c En los sistemas de producción con riego, el *CExC* se calculó utilizando los estimados a nivel estatal de uso de energía para riego reportados en (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018).

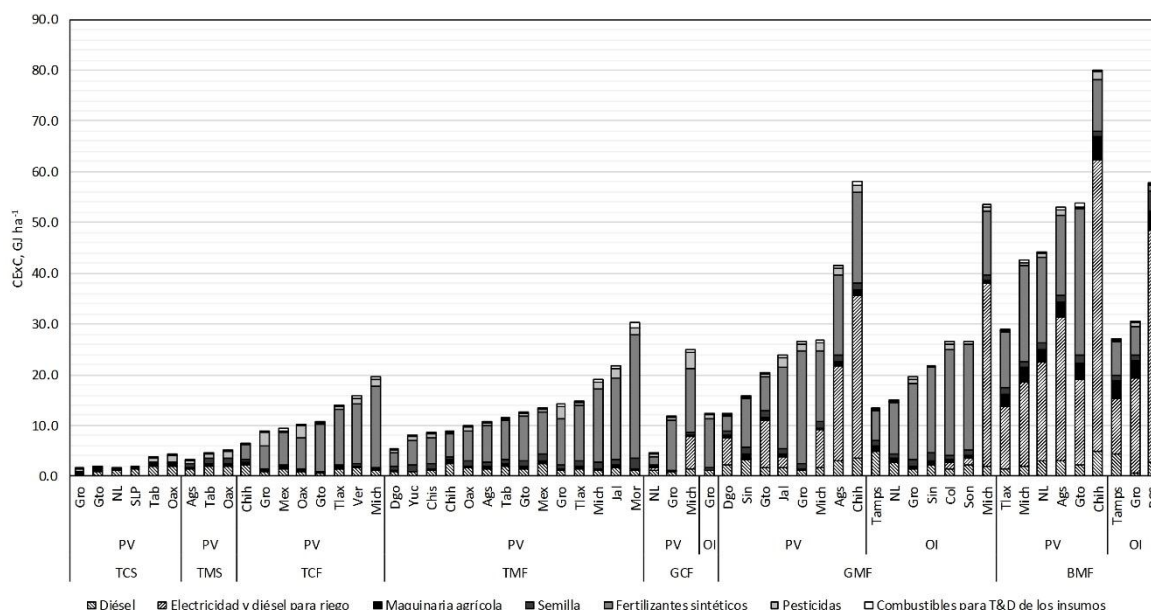


Figura IV.4. Consumo acumulado de exergía (CExC) por hectárea estimado para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible en (SIAP, 2008). PV, ciclo de producción primavera – verano; OI, ciclo de producción otoño – invierno; T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos; T&D, transporte y distribución. Maquinaria agrícola incluye equipo para riego. Las barras con patrones de línea representan los consumos directos de exergía. Las barras en colores sólidos representan los consumos indirectos de exergía.

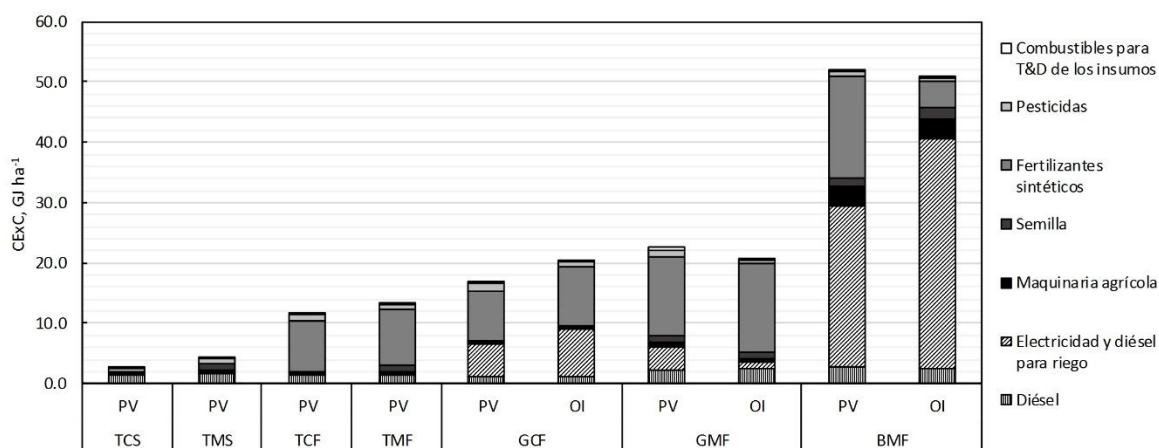


Figura IV.5. Consumo acumulado de exergía (CExC) promedio por hectárea estimado para los sistemas de producción de maíz seleccionados y contribución de los distintos insumos exergéticos. PV, ciclo de producción primavera – verano; OI, ciclo de producción otoño – invierno; T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos; T&D, transporte y distribución. Maquinaria agrícola incluye equipo para riego. Las barras con patrones de línea representan los consumos directos de exergía. Las barras en colores sólidos representan los consumos indirectos de exergía.

IV.3.3 Estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero

El rango y el promedio de los valores calculados de emisiones totales de GEI por hectárea, participación de las fuentes directas e indirectas de emisiones, GEI_{II} y GEI_{EI} se muestran en la **Tabla IV.16**. Las cantidades por entidad federativa se presentan en la **Tabla IV.17** y la contribución de las distintas fuentes de emisiones en los totales por hectárea puede verse en la **Figura IV.6**. Conforme a las estimaciones, el consumo de diésel en las operaciones agrícolas fue la fuente primaria de emisiones de GEI en los sistemas de producción TCS y TMS, generando cerca de 68% y 49%, respectivamente, de las emisiones totales de GEI promedio por hectárea, seguido de la fabricación de maquinaria agrícola (19% y 14%), pesticidas (13% y 12%), y semilla mejorada (24%) (**Figura IV.7**).

Por lo tanto, la mayoría de las emisiones total de GEI por hectárea del sistema de producción TCS provinieron de las fuentes directas mientras que en el caso del sistema de producción TMS, las fuentes indirectas fueron las dominantes. En estos dos sistemas de producción de maíz, el CO_2 representó 80% - 90% de las emisiones totales promedio por hectárea, el N_2O 5% - 10%, y el CH_4 5% - 10%. En los sistemas de producción TCF y TMF, la mayoría de las emisiones de GEI correspondió al N_2O derivado de la aplicación de fertilizantes nitrogenados, el cual representó casi 39% y 38%, respectivamente, de las emisiones totales promedio por hectárea, seguido de la fabricación de fertilizantes sintéticos, con 34% y 28%, el uso de diésel para las operaciones agrícolas, con 9% y 10%, el CO_2 de la aplicación de urea, con 7% y 9%, la fabricación de semilla mejorada, con 7%, y los pesticidas, con 5% y 4%. En consecuencia, las emisiones totales por hectárea de los sistemas de producción TCF y TMF se dividieron casi equitativamente entre las fuentes directas e indirectas, teniendo la siguiente composición aproximada, 54% CO_2 , 43% N_2O , y 3% CH_4 .

Las emisiones totales promedio por hectárea de los sistemas de producción con riego fueron también calculadas utilizando el promedio nacional ponderado de los requerimientos de electricidad y diésel para riego en lugar de los correspondientes valores estatales. Así, en el sistema de producción GCF la mayoría de las emisiones de GEI se asociaron al N_2O emanado de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados, con alrededor de 31% y 30% de las emisiones totales promedio por hectárea para los ciclos PV y OI, respectivamente, la producción de fertilizantes sintéticos, con 25% y 28%, y la generación de electricidad para riego, con 21% y 28%. De manera similar, en el sistema de producción GMF, las principales fuentes de emisiones fueron la aplicación de fertilizantes nitrogenados, con 36% y 41% de las emisiones totales promedio por hectárea para los ciclos PV y OI, respectivamente, la fabricación de fertilizantes sintéticos, con 27% y 32%, y el consumo de diésel para las operaciones agrícolas, con 9% y 10%. De ahí que, en el sistema de producción GCF las fuentes indirectas de emisiones en conjunto dominaron en el total de emisiones por hectárea en tanto que en el sistema de producción GMF, las emisiones totales por hectárea se repartieron casi en partes iguales entre las fuentes directas e indirectas. Por GEI, las emisiones totales promedio por hectárea del sistema de producción GCF consistieron en aproximadamente 67% CO_2 , 30%, N_2O y 3% CH_4 y aquellas del sistema de producción GMF, en 55% CO_2 , 41% N_2O y 4% CH_4 .

Respecto al sistema de producción BMF, la generación de electricidad necesaria para la aplicación de riego fue la fuente primordial de emisiones de GEI, aportando cerca de 38% de las emisiones totales promedio por hectárea calculadas para el ciclo PV y 65% de aquellas para el ciclo OI, por delante de las emisiones de N_2O debidas a la aplicación de fertilizantes nitrogenados, que representaron 23% y 7%, respectivamente, y de las emisiones por la fabricación de fertilizantes sintéticos, que constituyeron 20% y 6%.

Tabla IV.16. Rango y promedio de los valores estimados de las emisiones totales de GEI por hectárea, participación de las fuentes directas e indirectas de emisiones de GEI, intensidad de emisiones de GEI (*GEII*), y emisiones de GEI por unidad de energía utilizada (*GEIE_i*) de los sistemas de producción de maíz seleccionados.

Sistema de producción ^a	Ciclo ^b	Emisiones de GEI		Emisiones directas ^e		Emisiones indirectas ^e		<i>GEII</i>		<i>GEIE_i</i>	
		[kg-CO ₂ e ha ⁻¹]		[%]		[%]		[kg-CO ₂ e Mg ⁻¹ de grano]		[kg-CO ₂ e GJ ⁻¹]	
		Rango ^c	Media (DE) ^d	Rango	Media ^f	Rango	Media ^f	Rango	Media (DE) ^d	Rango	Media (DE) ^d
TCS	PV	72.48 - 264.43	152.91 (75.87)	50 - 82	68	18 - 50	32	26.36 - 244.84	116.53 (83.87)	52.41 - 71.49	63.06 (7.15)
TMS	PV	213.24 - 341.19	286.68 (66.04)	45 - 51	49	49 - 55	51	142.16 - 227.46	197.03 (47.61)	70.52 - 78.91	75.92 (4.69)
TCF	PV	554.05 - 1,589.29	1,005.71 (416.02)	43 - 67	56	33 - 57	44	223.23 - 737.98	452.82 (189.74)	94.79 - 129.00	106.81 (11.30)
TMF	PV	377.76 - 3,398.09	1,160.06 (778.25)	23 - 69	56	31 - 77	44	157.40 - 943.91	417.44 (204.02)	73.62 - 127.77	103.76 (12.62)
GCF	PV	353.34 - 1,985.02	1,264.59 (662.83)	44 - 67	43	33 - 56	57	88.34 - 409.28	332.30 (156.91)	93.72 - 110.53	90.36 (9.91)
	OI	-	1,415.26	-	37	-	63	-	471.75	-	91.67
GMF	PV	870.46 - 4,382.21	2,068.50 (724.94)	36 - 59	53	41 - 64	47	128.77 - 578.87	317.07 (126.15)	84.10 - 123.48	106.41 (9.03)
	OI	1,089.49 - 3,649.39	1,949.75 (600.79)	24 - 62	55	38 - 76	45	217.90 - 1,095.91	380.37 (109.58)	86.34 - 128.96	117.20 (11.69)
BMF	PV	2,032.75 - 4,709.13	3,475.78 (528.93)	23 - 43	35	57 - 77	65	371.71 - 673.27	545.11 (142.66)	74.08 - 100.18	86.04 (5.35)
	OI	1,709.44 - 3,161.49	2,855.76 (247.96)	14 - 44	19	56 - 86	81	379.87 - 503.42	601.86 (143.49)	68.82 - 76.12	70.97 (2.08)

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c Mínimo y máximo de los valores estimados. ^d Promedio simple y (desviación estándar) de los valores estatales de las emisiones totales de GEI por hectárea excepto para los sistemas de producción con riego, en los cuales se utilizó el promedio nacional ponderado (por superficie sembrada) de las emisiones de GEI asociadas al uso de energía para la aplicación del riego en lugar de los valores estatales de las emisiones de GEI asociadas al uso de energía para la aplicación de riego. ^e Comprende diésel para operaciones agrícolas, diésel para aplicación de riego, emisiones directas de N₂O de la aplicación de fertilizantes nitrogenados, y emisiones de CO₂ de la aplicación de urea. ^f Porcentajes en las emisiones totales de GEI promedio por hectárea. ^g Comprende fabricación de maquinaria agrícola, equipo de riego, semilla, fertilizantes sintéticos y pesticidas, así como consumo de combustibles fósiles utilizados en el transporte y la distribución de los insumos agrícolas y en la generación de electricidad para la aplicación de riego.

Tabla IV.17. Estimados de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) por hectárea, intensidad de emisiones de GEI (*GEII*), emisiones de GEI por unidad de energía utilizada (*GEIE_i*) para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible en (SIAP, 2008).

Sistema de producción ^a	Ciclo de producción ^b	Estado	Emisiones GEI ^c [kg CO ₂ e ha ⁻¹]	<i>GEII</i> [kg CO ₂ e kg ⁻¹ grano]	<i>GEIE_i</i> [kg CO ₂ e MJ ⁻¹]
TCS	PV	Nuevo León	113.9	113.9 × 10 ⁻³	64.6 × 10 ⁻³
		Guanajuato	107.2	43.9 × 10 ⁻³	57.4 × 10 ⁻³
		San Luis Potosí	130.5	87.0 × 10 ⁻³	63.4 × 10 ⁻³
		Guerrero	72.5	26.4 × 10 ⁻³	52.4 × 10 ⁻³
		Oaxaca	264.4	244.8 × 10 ⁻³	71.5 × 10 ⁻³
TMS	PV	Tabasco	228.9	183.1 × 10 ⁻³	69.1 × 10 ⁻³
		Aguascalientes	213.2	142.2 × 10 ⁻³	70.5 × 10 ⁻³
		Oaxaca	341.2	227.5 × 10 ⁻³	78.9 × 10 ⁻³
		Tabasco	305.6	221.5 × 10 ⁻³	78.3 × 10 ⁻³
TCF	PV	Chihuahua	554.0	369.4 × 10 ⁻³	95.1 × 10 ⁻³
		Guanajuato	625.0	223.2 × 10 ⁻³	105.8 × 10 ⁻³
		Michoacán	1,589.3	659.5 × 10 ⁻³	106.7 × 10 ⁻³
		México	979.0	349.6 × 10 ⁻³	129.0 × 10 ⁻³
		Guerrero	626.9	234.8 × 10 ⁻³	94.8 × 10 ⁻³
TMF	PV	Guerrero	1,255.5	523.1 × 10 ⁻³	111.4 × 10 ⁻³
		Oaxaca	866.1	524.9 × 10 ⁻³	98.9 × 10 ⁻³
		Veracruz	1,549.7	738.0 × 10 ⁻³	112.8 × 10 ⁻³
		Chihuahua	781.8	521.2 × 10 ⁻³	98.7 × 10 ⁻³
		Durango	457.3	481.4 × 10 ⁻³	101.5 × 10 ⁻³
		Aguascalientes	626.4	250.6 × 10 ⁻³	105.0 × 10 ⁻³
		Guanajuato	1,104.2	245.4 × 10 ⁻³	111.0 × 10 ⁻³
		Jalisco	2,093.7	418.7 × 10 ⁻³	114.5 × 10 ⁻³
		Michoacán	1,337.1	516.2 × 10 ⁻³	90.4 × 10 ⁻³
		México	1,079.6	431.8 × 10 ⁻³	103.2 × 10 ⁻³
		Guerrero	1,070.8	289.4 × 10 ⁻³	105.9 × 10 ⁻³
		Morelos	3,398.1	943.9 × 10 ⁻³	127.8 × 10 ⁻³
		Tlaxcala	1,343.8	497.7 × 10 ⁻³	111.6 × 10 ⁻³
		Chiapas	377.8	157.4 × 10 ⁻³	73.6 × 10 ⁻³
		Oaxaca	858.0	286.0 × 10 ⁻³	107.2 × 10 ⁻³
		Tabasco	1,080.9	593.9 × 10 ⁻³	108.5 × 10 ⁻³
		Yucatán	631.5	210.5 × 10 ⁻³	93.7 × 10 ⁻³
		Nuevo León	353.3	88.3 × 10 ⁻³	93.7 × 10 ⁻³
GCF	PV	Guerrero	962.7	343.8 × 10 ⁻³	110.5 × 10 ⁻³
		Michoacán	1,985.0	409.3 × 10 ⁻³	95.6 × 10 ⁻³
		Guerrero	997.7	332.6 × 10 ⁻³	110.7 × 10 ⁻³
GMF	PV	Durango	870.5	128.8 × 10 ⁻³	84.1 × 10 ⁻³
		Sinaloa	1,732.4	247.5 × 10 ⁻³	123.5 × 10 ⁻³
		Guanajuato	1,612.6	201.6 × 10 ⁻³	92.7 × 10 ⁻³
		Jalisco	2,197.4	313.9 × 10 ⁻³	110.5 × 10 ⁻³
		Guerrero	2,569.2	446.8 × 10 ⁻³	121.2 × 10 ⁻³
		Michoacán	2,157.7	401.1 × 10 ⁻³	100.0 × 10 ⁻³
		Aguascalientes	3,345.9	578.9 × 10 ⁻³	94.6 × 10 ⁻³
		Chihuahua	4,382.2	542.4 × 10 ⁻³	90.2 × 10 ⁻³
	OI	Tamaulipas	1,089.5	217.9 × 10 ⁻³	100.6 × 10 ⁻³
		Nuevo León	1,485.9	353.8 × 10 ⁻³	111.5 × 10 ⁻³
		Guerrero	1,577.4	350.5 × 10 ⁻³	113.0 × 10 ⁻³
		Colima	2,087.9	417.6 × 10 ⁻³	124.5 × 10 ⁻³
		Sinaloa	2,429.6	265.5 × 10 ⁻³	129.0 × 10 ⁻³
		Sonora	2,931.7	465.3 × 10 ⁻³	124.2 × 10 ⁻³
BMF	PV	Michoacán	3,649.4	1,095.9 × 10 ⁻³	86.3 × 10 ⁻³
		Tlaxcala	2,032.8	508.2 × 10 ⁻³	89.4 × 10 ⁻³
		Michoacán	3,020.1	561.4 × 10 ⁻³	92.7 × 10 ⁻³
		Nuevo León	2,973.7	371.7 × 10 ⁻³	90.2 × 10 ⁻³
		Guanajuato	3,763.9	418.2 × 10 ⁻³	100.2 × 10 ⁻³
		Aguascalientes	3,891.5	673.3 × 10 ⁻³	88.5 × 10 ⁻³
		Chihuahua	4,709.1	554.0 × 10 ⁻³	74.1 × 10 ⁻³
	OI	Tamaulipas	1,709.4	379.9 × 10 ⁻³	75.1 × 10 ⁻³
		Guerrero	1,718.0	429.5 × 10 ⁻³	76.1 × 10 ⁻³
		Baja California Sur	3,161.5	503.4 × 10 ⁻³	68.8 × 10 ⁻³

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c En los sistemas de producción con riego, las emisiones totales de GEI se calcularon utilizando los estimados a nivel estatal de uso de energía para riego reportados en (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018).

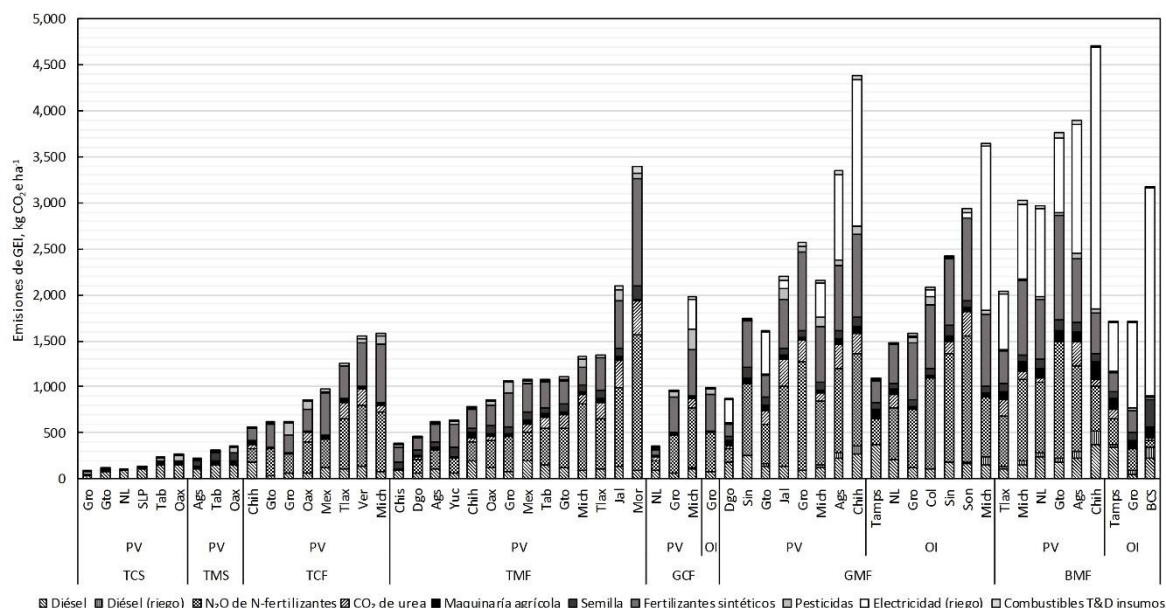


Figura IV.6. Emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) por hectárea estimadas para los sistemas de producción de maíz en los estados de la República con información disponible en (SIAP, 2008). PV, ciclo de producción primavera – verano; OI, ciclo de producción otoño – invierno; T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos; T&D, transporte y distribución. Maquinaria agrícola incluye equipo para riego. Las barras con patrones de línea representan las fuentes directas de emisiones. Las barras en colores sólidos representan las fuentes indirectas de emisiones.

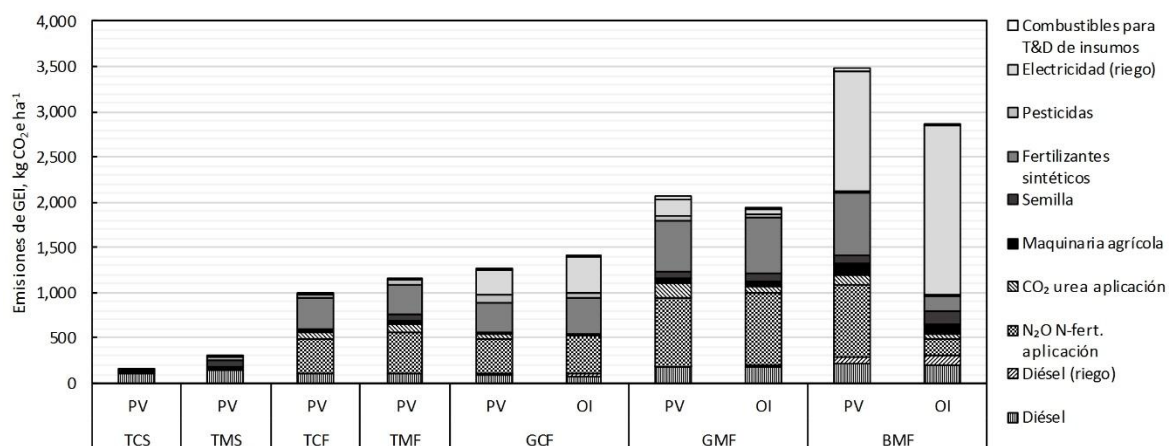


Figura IV.7. Emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) promedio por hectárea estimadas para los sistemas de producción de maíz seleccionados y contribución de las distintas fuentes de emisiones. PV, ciclo de producción primavera – verano; OI, ciclo de producción otoño – invierno; T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos; T&D, transporte y distribución. Maquinaria agrícola incluye equipo para riego. Las barras con patrones de línea representan las fuentes directas de emisiones. Las barras en colores sólidos representan las fuentes indirectas de emisiones de GEI.

En consecuencia, las fuentes indirectas de emisiones concentraron la mayor parte de las emisiones totales por hectárea estimadas para el sistema de producción BMF en ambos ciclos de cultivo. La distribución de las emisiones totales promedio por hectárea según el tipo de GEI fue aproximadamente como sigue, 71% CO₂, 25% N₂O y 4% CH₄ para el ciclo PV, y 87% CO₂, 9% N₂O y 4% CH₄ para el ciclo OI.

Las incertidumbres en los valores promedio calculados del uso de energía, *CExC*, y emisiones de GEI por hectárea sembrada, así como de los indicadores seleccionados se presentan en la **Tabla IV.18**.

Tabla IV.18. Incertidumbre relativa estimada en los valores promedio de uso total de energía por hectárea, intensidad energética (*EI*), energía neta (*NE*), cociente energía obtenida – energía usada (*ER*), consumo acumulado de exergía por hectárea (*CExC*), intensidad exergética (*ExI*), exergía neta (*NEx*), cociente exergía obtenida – exergía consumida (*ExR*), emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) por hectárea, intensidad de emisiones de GEI (*GEII*), y emisiones de GEI por unidad de energía usada (*GEIE_i*) para los sistemas de producción de maíz seleccionados.

Sistema de producción ^a	Ciclo ^b	Uso de energía	<i>EI</i>	<i>NE</i>	<i>ER</i>	<i>CExC</i>	<i>ExI</i>	<i>NEx</i>	<i>ExR</i>	Emisiones de GEI	<i>GEII</i>	<i>GEIE_i</i>
TCS	PV	±12%	±22%	±20%	±22%	±13%	±22%	±20%	±22%	±14%	±23%	±19%
TMS	PV	±8%	±8%	±4%	±8%	±7%	±8%	±4%	±8%	±8%	±8%	±11%
TCF	PV	±13%	±15%	±12%	±15%	±13%	±15%	±13%	±15%	±10%	±13%	±16%
TMF	PV	±13%	±16%	±15%	±16%	±12%	±15%	±15%	±15%	±11%	±15%	±17%
GCF	PV	±19%	±24%	±22%	±24%	±20%	±25%	±22%	±25%	±17%	±23%	±25%
	OI ^c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GMF	PV	±10%	±11%	±7%	±11%	±10%	±11%	±7%	±11%	±8%	±9%	±12%
	OI	±11%	±17%	±18%	±17%	±10%	±17%	±18%	±17%	±9%	±16%	±14%
BMF	PV	±4%	±13%	±21%	±13%	±5%	±13%	±23%	±13%	±5%	±13%	±6%
	OI	±4%	±15%	±35%	±15%	±4%	±15%	±39%	±15%	±5%	±15%	±7%

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b PV, primavera – verano; OI, otoño – invierno. ^c Sólo se contó con información para un estado de la República.

IV.3.4 Estimados a escala nacional

La superficie sembrada de maíz grano fue calculada en aproximadamente 6.2 millones de ha, repartida en más de dos millones de unidades de producción que en conjunto produjeron alrededor de 17.7 millones de toneladas de grano en el año agrícola 2006 – 2007. Los sistemas de producción de temporal concentraron alrededor de 85% de la superficie sembrada total.

En particular, el sistema de producción TCS por si sólo representó más de la mitad de la superficie total, distribuida principalmente en la región sur-sureste del país (**Tablas IV.19 y IV.20**). Los sistemas de producción TCF y TMF en conjunto acumularon cerca de un tercio de la superficie total, localizada sobre todo en los estados del centro del país. La superficie de maíz bajo riego constituyó sólo alrededor de 15% de la superficie sembrada total, la mayoría en los sistemas de producción GMF, GCF y GCS, concentrada en las regiones centro y norte del territorio nacional.

Tabla IV.19. Superficie sembrada bajo cada sistema de producción de maíz y estado de la República en el ciclo de producción primavera – verano estimada en base a información de (SNIEG, 2016). Cifras en [ha].

Estado	Sistema de producción ^a													Total estatal
	TCS	TMS	TCF	TMF	GCS	GMS	GCF	GMF	BCS	BMS	BCF	BMF	Otro ^b	
Aguascalientes	29,105.5	1,998.7	10,990.5	2,976.8	1,266.7	323.6	2,390.9	3,380.0	667.0	255.3	730.7	3,451.2	800.2	58,337.2
Baja California	158.8	24.3	9.1	47.4	37.9	9.2	86.5	22.8	120.0	-	44.7	201.2	2.0	763.9
Baja California Sur	917.9	35.3	54.3	46.4	483.6	5.4	93.1	68.0	348.3	24.3	821.6	2,444.3	124.0	5,466.5
Campeche	90,480.6	2,465.4	9,811.1	57,064.1	84.7	7.1	71.1	150.0	83.1	6.5	102.9	346.2	11.6	160,684.5
Coahuila	20,505.4	782.1	136.3	83.1	1,568.7	272.7	94.5	482.1	185.0	96.0	26.4	695.8	2.8	24,930.9
Colima	7,035.7	195.3	6,456.3	3,134.9	212.2	14.2	535.4	448.6	125.4	65.1	194.9	102.6	113.7	18,634.2
Chiapas	394,857.9	1,662.6	45,722.3	47,839.3	1,938.7	5.4	1,962.8	1,898.0	469.7	0.5	160.6	285.9	50.4	496,854.1
Chihuahua	97,034.0	1,637.4	71,571.0	7,982.2	3,092.2	207.5	3,319.8	8,095.9	1,338.3	92.8	6,339.9	13,862.6	1,540.3	216,113.9
Distrito Federal	2,193.0	86.3	1,009.4	95.4	6.8	0.3	2.5	-	20.1	-	4.6	3.4	20.0	3,441.7
Durango	61,751.5	2,277.0	20,520.9	9,758.2	3,096.7	422.5	4,936.6	7,577.4	374.4	37.3	311.0	2,281.5	993.7	114,338.6
Guanajuato	65,475.0	3,199.3	72,472.7	40,787.9	2,999.5	435.7	6,369.8	34,105.4	2,183.4	409.0	2,840.5	17,741.5	5,386.0	254,405.7
Guerrero	233,742.9	1,418.0	78,203.5	57,438.4	2,252.1	39.3	2,415.8	3,163.0	1,860.2	22.3	552.0	361.7	157.3	381,626.4
Hidalgo	102,964.3	2,033.5	28,742.6	3,037.6	10,579.2	6,243.1	4,925.1	10,925.3	745.9	275.4	601.8	301.2	853.6	172,228.6
Jalisco	125,323.7	5,413.5	118,419.1	234,941.7	2,320.5	380.2	5,021.8	17,490.2	1,670.5	266.5	4,002.3	10,048.2	2,535.6	527,833.6
México	106,669.5	2,857.9	198,359.3	14,770.0	9,243.9	748.7	48,771.3	4,768.1	244.3	13.6	1,004.5	164.5	485.6	388,101.2
Michoacán	182,285.5	2,247.8	135,962.7	39,449.4	7,097.0	358.3	20,983.6	27,900.9	501.3	78.8	1,429.0	3,096.0	3,134.9	424,525.1
Morelos	2,635.1	196.2	8,474.2	5,713.7	290.4	34.2	877.8	1,313.1	68.1	0.7	63.6	121.2	105.4	19,893.8
Nayarit	28,059.2	305.5	15,431.8	13,608.5	173.8	20.1	234.3	1,171.8	306.4	87.6	650.0	586.5	167.6	60,802.9
Nuevo León	73,405.9	1,762.2	1,675.5	202.0	2,768.0	179.3	137.6	37.3	831.8	68.7	118.3	272.9	224.0	81,683.6
Oaxaca	285,803.7	2,040.2	110,371.1	5,112.7	3,667.3	90.4	7,638.9	358.2	1,026.3	67.7	1,284.7	282.7	223.4	417,967.4
Puebla	124,686.8	2,104.7	194,557.0	13,829.5	4,712.8	647.4	10,930.5	5,386.3	528.9	57.2	1,987.2	932.4	511.6	360,872.3
Querétaro	33,435.8	723.5	22,490.5	1,470.3	2,444.4	388.6	7,956.2	4,068.7	1,089.8	309.9	1,283.6	3,122.5	805.6	79,589.4
Quintana Roo	74,533.5	812.6	2,083.9	2,291.3	37.5	5.5	16.0	185.8	36.0	0.8	31.0	63.0	10.7	80,107.6
San Luis Potosí	159,074.0	4,632.2	8,780.7	2,510.6	4,912.3	1,034.7	965.6	1,346.1	820.6	80.9	362.9	477.1	359.8	185,357.4
Sinaloa	37,615.0	1,678.9	5,395.4	2,730.2	3,538.5	1,271.3	14,210.2	103,305.0	127.8	66.7	681.4	1,706.2	4,416.5	176,743.1
Sonora	6,235.8	2,261.4	669.9	64.8	668.0	998.1	1,652.8	6,980.3	14.1	-	20.6	54.9	271.3	19,892.1
Tabasco	63,926.6	2,702.1	10,570.4	5,781.2	119.7	142.0	-	2.5	212.1	18.1	35.4	198.2	3.1	83,711.5
Tamaulipas	45,764.4	3,568.3	3,618.8	2,670.6	4,795.7	1,138.7	3,517.5	32,389.6	91.8	5.2	61.4	509.6	382.9	98,514.5
Tlaxcala	8,756.7	299.8	64,380.2	4,836.9	482.7	17.4	1,583.6	265.0	73.3	50.4	831.3	323.7	16.4	81,917.4
Veracruz	271,053.9	5,934.2	66,767.8	23,379.9	889.5	173.0	1,539.5	538.0	599.8	18.5	299.4	339.4	41.8	371,574.5
Yucatán	113,244.8	544.8	2,525.3	8,244.4	130.4	6.0	86.7	65.1	1,125.9	2.0	35.5	307.4	39.9	126,358.5
Zacatecas	186,056.0	3,163.3	34,916.0	12,125.8	11,609.2	456.9	5,349.0	3,050.1	1,493.1	332.2	1,035.4	1,163.2	256.0	261,006.2
Total nacional	3,034,788.3	61,064.4	1,351,149.7	624,024.9	87,520.9	16,076.8	158,676.6	280,938.5	19,382.9	2,809.9	27,949.1	65,848.7	24,047.6	5,754,278.4
% del total nacional	52.7	1.1	23.5	10.8	1.5	0.3	2.8	4.9	0.3	<0.1	0.5	1.1	0.4	100.0

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b Superficie en la cual los productores reportaron el uso conjunto de riego por gravedad y por bombeo (presurizado).

Tabla IV.20. Superficie sembrada bajo cada sistema de producción de maíz y estado de la República en el ciclo de producción otoño - invierno estimada en base a información de (SNIEG, 2016). Cifras en [ha].

Estado	Sistema de producción ^a												Otro ^b	Total estatal
	TCS	TMS	TCF	TMF	GCS	GMS	GCF	GMF	BCS	BMS	BCF	BMF		
Aguascalientes	754.7	36.8	329.8	117.5	36.7	4.3	56.6	47.3	16.0	0.7	2.9	92.1	4.4	1,499.8
Baja California	5.9	-	1.5	3.0	-	-	-	5.3	5.0	-	-	-	-	20.6
Baja California Sur	213.5	7.9	2.0	-	80.3	6.5	1.0	24.2	99.0	10.5	127.9	162.3	2.5	737.5
Campeche	5,551.0	146.1	424.4	545.1	0.0	6.3	-	1.2	0.5	-	2.2	5.2	-	6,681.9
Coahuila	312.9	45.3	49.5	1.0	131.9	56.1	18.0	103.3	0.7	-	-	-	-	718.7
Colima	199.2	8.3	221.8	94.8	59.7	1.7	52.2	141.8	17.2	5.0	12.0	6.0	1.0	820.8
Chiapas	30,262.6	94.4	1,388.6	1,372.0	176.5	0.5	97.4	565.0	15.2	-	25.1	145.7	-	34,142.9
Chihuahua	3,637.6	104.1	3,762.6	513.8	144.3	48.4	120.3	416.0	102.5	-	204.4	446.0	76.4	9,576.3
Distrito Federal	43.6	1.0	28.4	6.8	-	-	-	-	0.1	-	3.5	-	-	83.5
Durango	2,880.8	163.0	1,079.0	287.1	403.2	12.5	108.1	142.1	11.4	-	4.9	8.5	250.6	5,351.3
Guanajuato	1,874.5	128.2	2,384.5	1,270.8	129.2	109.0	424.0	3,401.6	22.0	-	179.7	1,764.1	209.8	11,897.3
Guerrero	5,412.1	115.0	2,309.9	1,830.7	196.8	0.6	268.7	475.7	151.9	0.5	38.4	32.6	21.9	10,854.7
Hidalgo	9,027.7	64.2	758.8	46.5	401.8	93.3	314.8	596.6	20.7	7.0	14.1	31.0	175.8	11,552.3
Jalisco	2,116.2	147.9	3,194.0	3,160.7	54.8	15.5	569.4	913.3	71.2	51.1	204.2	212.6	124.8	10,835.7
México	1,723.4	82.4	5,466.8	213.0	175.9	23.2	648.1	118.5	15.5	-	24.5	6.0	1.1	8,498.2
Michoacán	2,174.3	42.4	3,125.7	1,290.3	157.3	28.2	1,570.9	1,230.9	57.3	-	182.8	120.9	248.7	10,229.5
Morelos	57.8	13.9	207.2	454.5	18.0	2.5	115.3	263.9	0.2	-	1.6	14.5	13.5	1,163.0
Nayarit	1,422.1	78.9	694.2	422.0	71.8	-	103.0	803.6	183.1	15.4	330.7	1,021.8	578.0	5,724.7
Nuevo León	1,704.8	655.4	301.0	0.5	144.3	26.4	386.4	1.1	63.4	2.0	1.0	-	2.0	3,288.3
Oaxaca	20,137.2	165.1	6,514.1	468.5	469.4	18.9	1,493.8	75.8	109.3	7.0	150.4	22.6	35.5	29,667.6
Puebla	4,499.5	73.3	4,495.6	378.2	650.9	46.7	2,453.5	292.8	6.9	2.6	48.4	22.5	12.1	12,983.0
Querétaro	3,203.9	48.4	6,688.0	175.9	547.6	15.0	338.1	223.8	35.4	3.7	41.4	174.0	93.9	11,589.3
Quintana Roo	9,018.0	53.4	488.8	267.7	7.0	-	2.2	25.8	2.8	-	8.0	15.5	-	9,889.1
San Luis Potosí	6,272.6	215.5	1,112.7	460.6	252.6	125.1	210.9	443.9	33.5	3.8	138.8	152.8	141.4	9,564.2
Sinaloa	2,043.7	509.7	792.3	3,275.3	1,255.4	976.5	9,788.3	175,307.9	63.6	230.0	137.6	851.0	2,356.4	197,587.8
Sonora	220.9	5.1	5.0	42.6	79.5	26.6	268.4	2,951.8	22.1	2.6	6.0	-	5.0	3,635.7
Tabasco	5,623.7	95.2	636.8	116.9	1.7	-	-	-	4.3	-	-	0.2	-	6,478.8
Tamaulipas	1,551.8	513.3	548.1	1,480.4	375.5	258.7	243.9	1,836.5	-	-	-	163.1	83.8	7,055.0
Tlaxcala	94.8	7.5	472.5	100.7	4.6	-	26.4	7.5	1.0	-	7.6	9.0	-	731.5
Veracruz	33,011.5	450.0	5,460.1	6,977.0	67.5	35.2	78.2	33.8	68.4	6.8	0.8	6.6	0.1	46,195.9
Yucatán	2,478.2	37.3	27.9	223.2	13.7	-	1.8	4.2	65.8	-	-	4.9	4.6	2,861.5
Zacatecas	2,063.5	120.9	1,272.2	219.4	121.5	36.3	133.9	108.7	21.7	7.2	59.0	26.3	7.4	4,198.0
Country total	159,594.0	4,229.6	54,243.9	25,816.5	6,229.4	1,973.9	19,893.2	190,563.8	1,287.8	355.9	1,957.9	5,517.9	4,450.8	476,114.4
% of total	33.5	0.9	11.4	5.4	1.3	0.4	4.2	40.0	0.3	0.1	0.4	1.2	0.9	100.0

^a T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; S, sin aplicación de fertilizantes sintéticos; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^b Superficie en la cual los productores reportaron el uso conjunto de riego por gravedad y por bombeo (presurizado).

Los sistemas de producción con riego presurizado acumularon sólo alrededor de 2% de la superficie sembrada total, con una participación dominante del sistema de producción BMF cuya superficie se distribuyó principalmente en los estados del centro-occidente y noreste del país. Los sistemas de producción aquí examinados representaron conjuntamente alrededor de 5.8 millones de ha, esto es, casi 93% de la superficie sembrada estimada de maíz grano en todo el país.

A partir de los promedios calculados del uso total de energía, *CExC* y emisiones de GEI por hectárea para cada sistema de producción, los estimados a nivel nacional fueron alrededor de 40.5 PJ de uso de energía, 49.2 PJ de *CExC*, y 4.0 Tg CO₂e de emisiones de GEI. La contribución relativa de los sistemas de producción al uso de energía a nivel nacional fue aproximadamente 31% sistema TCF, 21% sistema GMF, 18% sistema TCS, 17% sistema TMF, 7% sistema BMF, 6% sistema GCF, y sistema TMS <1%. Los usos indirectos de energía concentraron la mayor parte del uso total de energía (cerca de 68%), en buena medida por la gran cantidad de energía necesaria para la fabricación de los fertilizantes sintéticos. Respecto al *CExC* estimado a escala nacional, la participación de los sistemas de producción fue aproximadamente como sigue, 33% sistema TCF, 21% sistema GMF, 17% sistema TMF, 15% sistema TCS, 8% sistema BMF, 6% sistema GCF, y <1% sistema TMS. Los insumos indirectos de exergía también acapararon la mayor proporción (alrededor de 74%) del *CExC* nacional, fundamentalmente debido a la fabricación de los fertilizantes sintéticos.

Respecto a las emisiones totales de GEI calculadas a nivel país, la distribución por sistema de producción fue aproximadamente: 34% sistema TCF, 24% sistema GMF, 18% sistema TMF, 12% sistema TCS, 6% sistema BMF, 6% sistema GCF, y <1% sistema TMS. Además, las emisiones se dividieron casi en partes iguales entre las fuentes directas (aproximadamente 55%) y las indirectas (45%), dada la relevancia de las emisiones generadas tanto por la producción como por la aplicación de los fertilizantes. La composición de las emisiones a nivel nacional por tipo de GEI fue aproximadamente como sigue, 61% CO₂, 36% N₂O y 3% CH₄.

IV.4. Discusión

Debido al uso limitado de insumos agrícolas, los sistemas de producción TCS y TMS mostraron los valores promedios más bajos de uso de energía por hectárea y *EI*, así como el valor promedio más alto de *ER* entre todos los sistemas de producción examinados. Estos resultados sugieren que los sistemas de producción TCS y TMS son los más eficientes desde el punto de vista del uso de energía. No obstante, estos mismos sistemas de producción exhibieron el menor valor promedio de *NE* debido a bajos rendimientos de producción de grano. La mayoría de la energía usada en los sistemas de producción TCS y TMS es en la forma de diésel para las operaciones agrícolas mecanizadas, por lo que la variabilidad en este insumo podría explicar en mucho las diferencias en el uso total de energía por hectárea entre los estados examinados. El *ER* promedio del sistema de producción TCS es comparable al reportado para el cultivo tradicional de maíz en México (10.7 – 16.0) y muy superior al calculado para la siembra tradicional de maíz en otros países en desarrollo (3.1 – 4.8) (Masera y Astier, 1996; Pimentel y Pimentel, 2008). Sin embargo, en los sistemas de producción TCS y TMS el principal insumo energético es diésel con una contribución marginal de energía humana y animal mientras que, según varias fuentes consultadas, la producción tradicional depende primordialmente del trabajo humano y animal (Masera y Astier, 1996; Masera et al., 1987; Orozco, 2007; Pimentel y Pimentel, 2008). De ahí que, los sistemas de producción TCS y TMS podrían más bien representar sistemas de producción en transición entre la técnica tradicional y una más

mecanizada, proceso que ha sido observado en algunas comunidades en México (Martínez-Negrete, Martínez, Joaquín, Sheinbaum, y Masera, 2013).

El uso total de energía promedio por hectárea de los sistemas de producción TCF y TMF resultó más del doble del estimado para sus contrapartes sin aplicación de fertilizantes sintéticos, lo que podría deberse a la gran cantidad de energía embutida en los fertilizantes aplicados. Sin embargo, el elevado uso de energía por unidad de superficie fue compensado en cierta medida por altos rendimientos de grano, lo que incrementó notablemente la *NE* promedio de los sistemas de producción TCF y TMF. La variación en las dosis de aplicación de los fertilizantes podría ser la causa primaria de las diferencias en el uso total de energía por hectárea entre los distintos estados analizados. En general, las dosis de aplicación más altas estuvieron asociadas con rendimientos de producción más altos, y por ende con una *NE* más alta y una *EI* más baja. Por ejemplo, el sistema de producción TMF con dosis elevadas de fertilizantes en los estados de Jalisco y Guanajuato exhibió un desempeño similar al de los sistemas intensivos de producción de maíz de temporal en los EE.UU., los cuales registran una *EI* entre 2.1 – 3.3 GJ Mg⁻¹ de grano (Kim et al., 2009).

El uso total de energía promedio por hectárea en los sistemas de producción de maíz con riego fue entre dos y cuatro veces superior al de sus contrapartes de temporal, lo que podría explicarse por un uso más intensivo de fertilizantes sintéticos y la energía adicional para el riego. Sin embargo, debido a rendimientos comparativamente superiores, los sistemas de producción con riego alcanzaron las *NE* promedio más altas entre todos los sistemas de producción examinados. Los elevados rendimientos de producción también ayudaron a limitar el aumento en las *EI* promedio por el uso más intensivo de insumos, de modo que éstas se ubicaron en un rango intermedio respecto a las de los otros sistemas de producción. Entre los sistemas de producción con riego, el sistema GMF tuvo los mejores valores promedio de *EI*, *NE*, y *ER* en buena medida por sus rendimientos notablemente altos. Nótese que en el sistema de producción GMF el uso de energía para riego se reduce considerablemente por el empleo de métodos de riego por gravedad y una contribución marginal de agua de pozo profundo (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018).

No obstante, el desempeño sobresaliente del sistema de producción GMF aún dista del alcanzado por los sistemas intensivos de producción de maíz bajo riego en los EE.UU., los cuales logran rendimientos (13.2 Mg ha⁻¹ en promedio) y *NE* (159.0 GJ ha⁻¹ en promedio) mucho más elevados (Grassini y Cassman, 2012). El uso total de energía promedio por hectárea en el sistema de producción BMF fue mayor al de los sistemas con riego por gravedad, aunque sus rendimientos de producción no aumentaron de forma proporcional por lo cual el sistema BMF tuvo la *EI* promedio más alta y el *ER* promedio más bajo entre todos los sistemas de producción analizados. Esto sugiere que el sistema de producción BMF utiliza la energía de forma más ineficiente en comparación con los otros sistemas de producción de maíz.

Las comparaciones de los indicadores basados en el *CExC* entre los sistemas de producción seleccionados en general son similares a las de los indicadores basados en el uso de energía, pues los resultados de los análisis energético y exergético fueron muy parecidos. Esta situación podría explicarse por las particularidades del proceso de producción agrícola, toda vez que las diferencias entre ambos análisis tienden a ser más notorias tratándose de procesos industriales. Los valores reportados del *CExC* en el cultivo de maíz van desde 27.8 GJ ha⁻¹ (4.4 GJ Mg⁻¹ de grano) en Canadá (Berthiaume et al., 2001) a 39.6 GJ ha⁻¹ (4.6 GJ Mg⁻¹ de grano) en los EE.UU. (Patzek, 2004) y hasta 51.9 GJ ha⁻¹ (10.5 GJ Mg⁻¹ de grano) en China (Yang et al., 2009). En todos los casos anteriores, los fertilizantes sintéticos concentran la mayor proporción del *CExC* (40% - 70%), lo cual concuerda con

los resultados del presente estudio. Las discrepancias podrían atribuirse a diferencias en las dosis de fertilización y la contabilización del uso de combustibles en las operaciones post-cosecha, las cuales fueron ignoradas en el presente análisis. Los resultados del *CExC* subrayan que tanto la producción de fertilizantes sintéticos como la generación de electricidad para riego demandan un flujo importante de recursos naturales. De ahí que una mejor eficiencia en la producción y utilización de los fertilizantes sintéticos y la electricidad en los sistemas de producción de maíz podría contribuir significativamente a robustecer la sustentabilidad del cultivo de maíz en México.

Con respecto a las emisiones de GEI, los sistemas de producción TCS y TMS registraron los menores valores promedio de emisiones totales de GEI por hectárea, GEI , y GEI_e , entre todos los sistemas de producción, muy posiblemente debido al uso limitado de insumos agrícolas. Los sistemas de producción TCF y TMF registraron más emisiones totales de GEI promedio por unidad de superficie que sus contrapartes sin aplicación de fertilizantes, incremento que podría atribuirse fundamentalmente a las emisiones asociadas a la producción y utilización de fertilizantes sintéticos. No obstante, la GEI promedio de los sistemas de producción TCF y TMF resultó moderadamente superior puesto que el incremento en las emisiones de GEI por unidad de superficie cultivada fue compensada por una mayor productividad de grano en los sistemas de producción con aplicación de fertilizantes. La relevancia de las emisiones de GEI de la producción y utilización de fertilizantes sintéticos es consistente con lo reportado en estudios similares sobre el cultivo de maíz en los EE.UU. (Kim et al., 2009) y Canadá (Ma, Liang, Biswas, Morrison, y McLaughlin, 2012).

Las emisiones totales de GEI promedio por superficie sembrada de los sistemas de producción GCF y GMF fueron mayores a las de sus contrapartes de temporal, lo que podría explicarse en gran parte por el uso adicional de energía para riego y dosis más altas de fertilizantes. Sin embargo, debido a la mayor productividad de los sistemas de producción GCF y GMF, sus GEI promedio son de las más bajas entre todos los sistemas de producción analizados. En particular, el sistema de producción GMF en el estado de Sinaloa se compara favorablemente con los sistemas intensivos de producción de maíz de riego de alto rendimiento en los EE.UU. en cuanto a emisiones totales de GEI por unidad de superficie ($3,000.0 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$) y por unidad de grano producido ($231.0 \text{ kg CO}_2\text{e Mg}^{-1}$) (Grassini y Cassman, 2012). El sistema de producción BMF registró los valores promedios más altos de emisiones totales de GEI por hectárea y GEI , muy probablemente por las emisiones adicionales por el uso de energía para riego y el aumento modesto en el rendimiento de producción de grano. Los sistemas GMF, TCF y TMF tuvieron los valores promedio más altos de GEI_e , lo cual podría estar relacionado con el uso intensivo de insumos agrícolas con altas emisiones de GEI embutidas, en particular fertilizantes nitrogenados, en dichos sistemas de producción. Obsérvese que, dadas las limitaciones en los datos recopilados, otras fuentes de emisiones de GEI, como la descomposición de residuos agrícolas y las emisiones indirectas de N_2O , no fueron cuantificadas, de modo que las emisiones de GEI aquí calculadas podrían estar subestimadas.

La relevancia de los fertilizantes sintéticos en el uso total de energía, el *CExC*, y las emisiones totales de GEI remarca la relevancia de la eficiencia del uso de fertilizantes en el desempeño en términos de uso de recursos naturales e impactos ambientales de los sistemas de producción de maíz. Estimaciones globales sugieren que sólo cerca de 30% - 50% del N fertilizante aplicado, 10% - 45% de P fertilizante aplicado, y 20% - 40% del K fertilizante aplicado es aprovechado por los cultivos (Baligar y Bennett, 1986; Tilman, Cassman, Matson, Naylor, y Polasky, 2002). Los datos recopilados en el presente estudio son insuficientes para derivar información detallada y confiable sobre este aspecto específico del cultivo de maíz en México, aunque es muy probable que la eficiencia del uso de fertilizantes sintéticos sea baja al menos en parte debido a que la aplicación excesiva de

fertilizantes es una práctica común en la producción agrícola en México, especialmente en los sistemas intensivos de producción (Jara-Durán, 2012). De ahí que, la adopción de mejores prácticas de manejo de fertilizantes podría reducir la cantidad de fertilizantes utilizada y por ende, ayudar a disminuir el uso de energía, el *CExC* y las emisiones de GEI de los sistemas de producción de maíz.

En general, las incertidumbres en los valores promedios estimados son considerables debido a (i) el número reducido de entidades federativas con información disponible y (ii) la gran variabilidad en los niveles de uso de insumos agrícolas, principalmente los correspondientes al diésel para operaciones agrícolas, fertilizantes sintéticos, y pesticidas. Aunado a esto, las fluctuaciones en los rendimientos de grano entre los sistemas de producción introducen incertidumbre adicional en los valores promedios de *EI*, *NE*, *ER*, *ExI*, *NEx*, *ExR* y *GEII*. Estimaciones más precisas podrían obtenerse mediante, por ejemplo, la realización de análisis por separado de regiones geográficas donde las prácticas de producción de maíz sean relativamente homogéneas.

El uso anual de energía final en el sector agropecuario en México en el periodo 2006 – 2007 promedió aproximadamente 130.0 PJ, la mayor parte en forma de diésel (74%) y electricidad (22%) (SIE, 2017b). Nótese que esta cifra sólo considera la energía usada directamente en las unidades de producción agropecuarias por lo que representa los usos directos de energía en la siembra de cultivos y la cría de ganado. En base a esta cifra, el uso total de energía estimado a nivel nacional considerando los sistemas de producción de maíz aquí examinados (cerca de 13.0 PJ) representaría sólo alrededor de 10% del uso de energía final en todo el sector agropecuario. De igual forma, las emisiones de GEI estimadas a escala nacional relacionadas con los usos directos de energía (cerca de 870.0 Gg CO₂e) y la aplicación de fertilizantes (1,530.0 Gg CO₂e) en los sistemas de producción de maíz analizados, equivaldrían a casi 7% de las emisiones totales de GEI por el uso de energía en el sector agropecuario nacional (12,266 Gg CO₂e) y 22% de aquellas de suelos agrícolas en todo el país (6,969 Gg CO₂e) reportadas para el año 2006 (INE-SEMARNAT, 2009). A la fecha, la información sobre los usos indirectos de energía y las emisiones indirectas de GEI a escala nacional asociados con la actividad agrícola no está disponible. Los porcentajes más o menos pequeños del uso de energía y las emisiones de GEI estimados para la producción de maíz en relación a las cifras totales del sector agropecuario parecen razonables dada la relevancia de los sistemas de producción con baja y mediana intensidad de uso de insumos agrícolas en la superficie nacional de maíz grano.

IV.5. Conclusiones

El uso total de energía, el *CExC*, y las emisiones totales de GEI fueron calculadas para siete sistemas de producción de maíz. Las estimaciones varían notablemente dentro y entre los sistemas de producción debido en gran medida a diferencias en los tipos y cantidades de insumos agrícolas aplicados y las operaciones agrícolas realizadas, así como en los rendimientos de producción, que resultan en parte de la diversidad de condiciones agro-climáticas y socio-económicas que influyen en la producción de maíz en México.

El uso de diésel para las operaciones agrícolas, la fabricación y aplicación de fertilizantes sintéticos, y la generación de electricidad para riego son los principales componentes del uso total de energía, el *CExC*, y las emisiones totales de GEI de los sistemas de producción de maíz examinados. Los sistemas de producción de temporal con uso reducido de insumos agrícolas, los cuales concentran la mayor proporción de la superficie nacional de maíz, registran bajo uso total de energía, *CExC*, y emisiones totales de GEI por unidad de superficie sembrada, aunque en general también exhiben

rendimientos pobres de producción de manera que requieren grandes porciones de tierra para producir cantidades sustantivas de grano. En contraste, los sistemas de producción intensivos en insumos agrícolas muestran valores mucho mayores de uso total de energía, CExC, y emisiones totales de GEI por hectárea debido principalmente a dosis elevadas de fertilizantes sintéticos y la aplicación de agua de riego. Sin embargo, al mismo tiempo estos sistemas de producción registran rendimientos de grano elevados, por lo cual el uso de recursos y las cargas ambientales por unidad de grano cosechado se ubican en niveles intermedios. Reducir el uso diésel en las operaciones agrícolas mecanizadas, incrementar la eficiencia en el uso de fertilizantes sintéticos y agua de riego, así como utilizar fertilizantes orgánicos y fuentes alternativas de energía para el bombeo de agua de riego podrían ayudar a incrementar la sustentabilidad de los sistemas de producción de maíz.

Las modificaciones en los métodos de producción y las intervenciones de política pública más apropiadas para promover estos cambios deberían ser discutidas en trabajos posteriores. La identificación y evaluación de alternativas tanto para aumentar los rendimientos en los sistemas de producción con bajos insumos agrícolas como para mejorar la eficiencia en el uso de insumos agrícolas en los sistemas intensivos de producción en una forma sustentable también podría ser el objeto de estudio de trabajos posteriores. Asimismo, dado que las estimaciones del presente estudio se basan enteramente en información secundaria, debido a restricciones de tiempo y recursos para recabar datos directamente de las unidades producción de maíz en todo el país, es necesario validarlos mediante mediaciones en los campos de cultivo. Los resultados aquí reportados podrían ser de utilidad para realizar análisis con perspectiva de ciclo de vida del uso de energía, CExC, y emisiones de GEI de los distintos productos industrializados derivados del maíz.

IV.6 Referencias

- ANACOFER. (2006). *Mercado de fertilizantes en México: Perspectivas 2006*. Ciudad de México: Asociación Nacional de Comercializadores de Fertilizantes, A.C., <http://www.fertilizando.com/estadisticas/mercadomexicanofertilizantes2006.pdf> [consultado el 6/11/2016].
- ANACOFER. (2011). *Fertilizantes y amoniaco en México*. Ciudad de México: Asociación Nacional de Comercializadores de Fertilizantes, A.C., http://ptq.pemex.com.mx/productosyservicios/eventosdescargas/Documents/Foro_PEMEX_Petroqu%25C3%25ADmica/2011/Amoniaco_y_sus_perspectivas_por_ANACOFER.pdf [consultado el 5/11/2016].
- Arslan, A., y Taylor, J. E. (2009). Farmers' subjective valuation of subsistence crops: The case of traditional maize in Mexico. *American Journal of Agricultural Economics*, 91(4), 956–972.
- Audsley, E., Stacey, K., Parsons, D. J., y Williams, A. G. (2009). *Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use*. Cranfield, AL., https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/3913/1/Estimation_of_the_greenhouse_gas_emissions_from_agricultural_pesticide_manufacture_and_use-2009.pdf [consultado 29/11/2016].
- Baligar, V. C., y Bennett, O. L. (1986). Outlook on fertilizer use efficiency in the tropics. *Fertilizer Research*, 10, 83–96.
- Batty, J. C., y Keller, J. (1980). Energy requirements for irrigation. En D. Pimentel (Ed.), *Handbook of energy utilization in agriculture* (pp. 35–44). Boca Raton, FL.: CRC Press.
- Berthiaume, R., Bouchard, C., y Rosen, M. A. (2001). Exergetic evaluation of the renewability of a biofuel. *Exergy An International Journal*, 1(4), 256–268.
- Bond, L. K., y Beard, R. (1997). *The cost of owning and operating farm machinery*. Logan, UT: All archived publications. Paper 23. Utah State University Cooperative Extension, http://extension.usu.edu/files/publications/publication/AG_503.pdf [consultado el 15/12/2016].

- Bösch, M. E., Hellweg, S., Huijbregts, M. A. J., y Frischknecht, R. (2007). Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(3), 181–190.
- Boto, F. J., Pastrana, P. S., y Cepeda, M. S. M. (2005). *Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10255_Consumos_energeticos_operaciones_agricolas_Espana_05_b8820458.pdf [consultado el 20/12/2016].
- Bowers, W. (1992). Agricultural field equipment. En B. A. Stout (Ed.), *Energy in farm production - Energy in world agriculture* (pp. 117–130). Amsterdam: Elsevier.
- Brehmer, B., Struik, P. C., y Sanders, J. (2008). Using an energetic and exergetic life cycle analysis to assess the best applications of legumes within a biobased economy. *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1175–1186.
- Camargo, G. G. T., Ryan, M. R., y Richard, T. L. (2013). Energy use and greenhouse gas emissions from crop production using the farm energy analysis tool. *BioScience*, 63(4), 263–273.
- CFE. (2014). *Reporte Anual 2014*. Ciudad de México: Comisión Federal de Electricidad, <http://www.cfe.gob.mx/inversionistas/StyleLibrary/assets/pdf/InformeAnual.pdf> [consultado el 19/01/2017].
- Currell, G. (2015). *Scientific data analysis*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Dalgaard, T., Halber, N., y Porter, J. R. (2001). A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compared organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 87(1), 51–65.
- Dendooven, L., Gutiérrez-Oliva, V. F., Patiño-Zúñiga, L., Ramírez-Villanueva, D. A., Verhulst, N., Luna-Guido, M., ... Govaerts, B. (2012). Greenhouse gas emissions under conservation agriculture compared to traditional cultivation of maize in the central highlands of Mexico. *Science of the Total Environment*, 431, 237–244.
- Dewulf, J., y Van Langenhove, H. (2004). Thermodynamic optimization of the life cycle of plastics by exergy analysis. *International Journal of Energy Research*, 28(11), 969–976.
- Dewulf, J., Van Langenhove, H., y Van De Velde, B. (2005). Exergy-based efficiency and renewability assessment of biofuel production. *Environmental Science and Technology*, 39(10), 3878–3882.
- DOT-DOT. (2010). *2007 Commodity Flow Survey - Exports*. Washington, DC: US Department of Transportation - US Department of Commerce, http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov/bts/files/publications/commodity_flow_survey/2007/exports/pdf/entire.pdf [consultado el 21/11/2016].
- Dutilh, C. E., y Linnemann, A. R. (2004). Energy use in food system. En C. J. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of Energy* (pp. 719–726). Amsterdam - Boston: Elsevier.
- FAOSTAT. (2016). *Fertilizers and pesticides by country*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, <http://www.fao.org/faostat/en/#data> [consultado el 7/11/2016].
- Grassini, P., y Cassman, K. G. (2012). High-yield maize with large net energy yield and small global warming intensity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(4), 1074–9.
- Green, M. (1987). Energy in pesticide manufacture, distribution and use. En Z. R. Helsel (Ed.), *Energy in plant nutrition and pest control. Energy in World Agriculture. Vol. 2* (pp. 165–177). The Netherlands: Elsevier.
- GREET. (2015). *The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model - GREET Model*. Argonne, IL: Argonne National Laboratory. US Department of Energy.
- Haswell, M. (1981). *Energy for subsistence*. London: The MacMillan Press LTD.
- Hennecke, A. M., Mueller-Lindenlauf, M., García, C. A., Fuentes, A., Riegelhaupt, E., y Hellweg, S. (2016). Optimizing the water, carbon, and land-use footprint of bioenergy production in Mexico - Six case studies and the nationwide implications. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 10(3), 222–239.
- Hetz, H. E., y Villalobos, H. (1985). Consumo específico y ahorro de combustible en la operación de tractores agrícolas. *Ciencia e Investigación Agraria*, 12(2), 129–136.
- Hoang, V. N., y Rao, D. S. P. (2010). Measuring and decomposing sustainable efficiency in agricultural production: A cumulative exergy balance approach. *Ecological Economics*, 69(9), 1765–1776.
- IMT. (2015). *Manual estadístico del sector transporte 2015*. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte. <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/Manual/mn2015.pdf> [consultado el 22/11/2016].
- INE-SEMARNAT. (2009). *México. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones*

- Unidas sobre el Cambio Climático. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164168/Cuarta Comunicaci n Nacional.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/164168/Cuarta_Comunicaci_n_Nacional.pdf) [consultado el 26/02/2017].
- INECC. (2012). *Quinta comunicaci3n nacional ante la Convenci3n Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/685.pdf> [consultado el 15/02/2017].
- INECC. (2014). *Factores de emisi3n para los diferentes tipos de combustibles f3siles y alternativos que se consumen en México*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Project No. F.61157.02.005, [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014 FE tipos combustibles fosiles.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf) [consultado el 10/12/2016].
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Japan: National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- IPCC. (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group I: The physical science basis*. Cambridge, UK - New York, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html [consultado el 8/01/2017].
- IPNI. (2010). *Potassium fertilizer production and technology*. Georgia, USA: International Plant Nutrition Institute, [http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/68907f5d1e5922f8062577ce006ad872/\\$FILE/K Fert Prod & Tech 11 16 10.pdf](http://www.ipni.net/ipniweb/portal.nsf/0/68907f5d1e5922f8062577ce006ad872/$FILE/K_Fert_Prod_11_16_10.pdf) [consultado el 9/01/2017].
- Jara-Durán, K. A. (2012). Los fertilizantes y sus efectos ambientales. En Pérez-Espejo R.H. y A. Aguilar-Ibarra (Eds.), *Agricultura y contaminaci3n del agua* (pp. 207–231). México D.F.: Instituto de Investigaciones Econ3micas, UNAM.
- Jayasundara, S., Wagner-Riddle, C., Dias, G., y Kariyapperuma, K. A. (2014). Energy and greenhouse gas intensity of corn (*Zea mays* L.) production in Ontario: A regional assessment. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(1), 77–95.
- Juárez-Hernández, S., y Sheinbaum, C. (2018). Irrigation energy use and related greenhouse gas emissions of maize production in Mexico. *International Journal of Water Resources Development*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1482739>
- Kim, S., Dale, B. E., y Jenkins, R. (2009). Life cycle assessment of corn grain and corn stover in the United States. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(2), 160–174.
- Kirova-Yordanova, Z. (1998). Cumulative Exergy Consumption in Fertilizers Production. En A. Bejan, M. Feidt, M. J. Moran, y G. Tsatsaronis (Eds.), *Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Aspects of Energy Systems and Processes, ECOS Conference 1998* (pp. 195–201). Nancy, France.
- Lewis, D. A. (1982). The role of energy in U.K. agriculture. En D. W. Robinson y R. C. Mollan (Eds.), *Energy management and agriculture. Proc. First Summer School in Agriculture* (pp. 43–65). Dublin, Ireland: Elsevier.
- Lewis, O. (1951). *Life in a Mexican-village: Tepoztlan restudied*. Urbana, IL: University of Illinois.
- Lora, D. C., Ramos, R. G., y Fernández, M. S. (2015). Consumo energético de la maquinaria agrícola con el empleo de técnicas de agricultura de precisi3n. *Revista Ingeniería Agrícola*, 5(2), 23–28.
- Ma, B. L., Liang, B. C., Biswas, D. K., Morrison, M. J., y McLaughlin, N. B. (2012). The carbon footprint of maize production as affected by nitrogen fertilizer and maize-legume rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94(1), 15–31.
- Martínez-Negrete, M., Martínez, R., Joaquín, R., Sheinbaum, C., y Masera, O. R. (2013). Is modernization making villages more energy efficient? A long-term comparative end-use analysis for Cheranatzicurin village, Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 17(5), 463–470.
- Masera, O., y Astier, M. (1996). Energía y sistema alimentario: Contribuciones de la agricultura alternativa. En J. A. Trujillo, F. G. de León, R. A. Calder3n, y P. L. Torres (Eds.), *Ecología aplicada a la agricultura. Temas selectos de México* (pp. 17–34). México, D.F.: Universidad Aut3noma Metropolitana - Xochimilco.
- Masera, O. R. (1990). *Crisis y mecanizaci3n de la agricultura campesina*. México D.F.: El Colegio de México.
- Masera, O. R., Almeida, R. S., Cervantes, J., Dutt, G. S., García, L., Garza, J. F., ... Sheinbaum, C. (1987). *El patr3n*

- de consumo energético y su diferenciación social. Estrudio de caso en una comunidad rural de México.* México D.F.: Cuadernos sobre prospectiva energética no. 108. El Colegio de México.
- Montañez, R., y Warman, A. (1982). *El cultivo de maíz en México. Diversidad, limitaciones y alternativas. Seis casos de estudio.* México, D.F.: Centro de Ecodesarrollo.
- Moya, C., Domínguez, R., Van Langenhove, H., Herrero, S., Gil, P., Ledón, C., y Dewulf, J. (2013). Exergetic analysis in cane sugar production in combination with Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, 59, 43–50.
- Mudahar, M. S., y Hignett, T. P. (1987). Energy requirements, technology, and resources in the fertilizer sector. En Z. R. Helsel (Ed.), *Energy in plant nutrition and pest control. Energy in World Agriculture. Vol. 2* (pp. 25–61). The Netherlands: Elsevier.
- NATS. (2015). *Top Canadian gateways for North American merchandise trade by mode 2015.* North American Transportation Statistics, <http://nats.sct.gob.mx/english/> [consultado el 15/11/2016].
- Orozco, R. Q. (2007). *El sistema alimentario del maíz en Pátzcuaro Michoacán.* Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, UNAM, Mexico.
- Özilgen, M., y Sorgüven, E. (2011). Energy and exergy utilization, and carbon dioxide emission in vegetable oil production. *Energy*, 36, 5954–5967.
- Patel, N. K. (2013). Potassium Chloride. En N. K. Patel (Ed.), *Heavy and fine chemicals* (pp. 262–264). Inidia: National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL).
- Patzek, T. W. (2004). Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(6), 519–567.
- Pimentel, D. (2004). Energy flows in industrial agriculture. *Encyclopedia of Energy*, 365–371.
- Pimentel, D., y Pimentel, M. (2008). *Food, energy and society.* Boca Raton, FL.: CRC Press.
- Ptasinski, K. J. (2016). *Efficiency of biomass energy. An exergy approach to biofuels, power, and biorefineries.* Hoboken, NJ: Wiley.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J. P., y García-Casal, M. N. (2014). Global maize production, utilization and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1312(1), 105–112.
- Rooney, L. W., y Serna-Saldivar, S. O. (2003). Food use of whole corn and dry-milled fractions. En P. J. White y L. A. Johnson (Eds.), *Corn: Chemistry and Technology* (pp. 495–535). St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists.
- Salami, P., Ahmadi, H., y Keyhani, A. (2010). Estimating the Equivalent Energy for Single Super Phosphate Production in Iran. *Journal of Scientific Review*, 2(1), 64–72.
- SCT. (2010). *Anuario estadístico de transporte marítimo 2010.* Ciudad de México: Dirección General de Marina Mercante. SCT, http://www.sct.gob.mx/fileadmin/CGPMM/U_DGMM/ESTADISTICAS/2010/TRS_MRTIMO/AETM10_in_dice.pdf [consultado el 20/11/2016].
- SCT. (2015). *Anuario estadístico ferroviario 2015.* Ciudad de México: Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal. SCT, <http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/transporte-ferroviario-y-multimodal/anuarios-dgtfm-edicion-digital/> [consultado el 22/11/2016].
- SIAP. (2008). *Seguimiento de costos de producción pecuaria y agrícola por sistema-producción.* México D.F.: Project SISPRO-SECOPPA. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA, <http://www.campomexicano.gob.mx/viocs/acceso.php#> [consultado el 20/01/2016].
- SIAP. (2016). *Sistema de seguimiento oportuno del comercio exterior.* Ciudad de México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA, http://w6.siap.gob.mx/comercio/con_fracciona.gobmx.php [consultado el 16/11/2016].
- SIAP. (2017a). *Balanza disponibilidad-consumo de maíz grano.* Ciudad de México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, <http://www.numerosdelcampo.sagarpa.gob.mx/publicnew/productosAgricultivos/cargarPagina/4> [consultado el 10/04/2017].
- SIAP. (2017b). *Sistema de información agroalimentaria de consulta (SIACON) 1980-2014.* Ciudad de México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430> [consultado el 25/04/2017].
- SIAP. (2016). *Sistema de información arancelaria vía Internet - Estadísticas anuales de comercio exterior por fracción arancelaria.* Ciudad de México: Secretaría de Economía, <http://www.economia-snci.gob.mx/>

- [consultado el 9/11/2016].
- SIE. (2017a). *Anuario estadístico de petroquímica*. Ciudad de México: Sistema de Información Energética. SENER, <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas> [consultado el 06/11/2016].
- SIE. (2017b). *Datos sobre el origen y destino de la energía*. Ciudad de México: Sistema de Información Energética, SENER, <http://sie.energia.gob.mx/> [consultado el 20/02/2017].
- SIE. (2017c). Generación de electricidad por tecnología. Ciudad de México: Sistema de Información Energética, SENER. Retrieved from <http://sie.energia.gob.mx/> [consultado el 20/02/2017].
- Singh, H., Mishra, D., Nahar, N. M., y Ranjan, M. (2003). Energy use pattern in production agriculture of a typical village in arid zone, India - part II. *Energy Conversion and Management Manag.*, 44, 1053–1067.
- SNICS. (2016). *Estadísticas de producción de semillas*. Ciudad de México: Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. SAGARPA, <http://snics.sagarpa.gob.mx/certificacion/estadisticas/Paginas/default.aspx> [consultado el 09/11/2016].
- SNIEG. (2016). *Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007*. Ciudad de México: Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica. Procesamiento de Microdatos en el Laboratorio de Microdatos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Soni, P., Taewichit, C., y Salokhe, V. M. (2013). Energy consumption and CO₂ emissions in rainfed agricultural production systems of Northeast Thailand. *Agricultural Systems*, 116, 25–36.
- Stout, B. A. (1990). *Handbook of energy for world agriculture*. London - New York: Elsevier.
- Szargut, J. (2005). *Exergy method. Technical and ecological applications*. Great Britain: WIT Press.
- Szargut, J., Morris, D. R., y Steward, F. R. (1988). *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*. New York: Hemisphere Publishing Corp.
- Taylor, J. R. (1997). *An introduction to error analysis. The study of uncertainties in physical measurement* (2nd Editio). Sausalito, CA: University Science Books.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., y Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418, 671–677.
- Toledo, V. M., Carabias, J., Toledo, C., y González, C. (1989). *Producción rural de México: Alternativas ecológicas*. México, D.F.: Fundación Universo XXI.
- Tollenaar, M., y Dwyer, L. M. (1999). Physiology of maize. En D. L. Smith y C. Hamel (Eds.), *Crop yield* (pp. 169–204). Berlin: Springer.
- Valero, A., Valero, A., y Vieillard, P. (2012). The thermodynamic properties of the upper continental crust: Exergy, Gibbs free energy and enthalpy. *Energy*, 41(1), 121–127.
- West, T. O., y Marland, G. (2002). A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 91(1–3), 217–232.
- Wood, S., y Cowie, A. (2004). *A review fo greenhouse gas emission factors for fertiliser production*. New South Wales: Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting. IEA Bioenergy Task 38.
- Yang, Q., Chen, B., Ji, X., He, Y. F., y Chen, G. Q. (2009). Exergetic evaluation of corn-ethanol production in China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14(5), 2450–2461.

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

CAPÍTULO V

Potencial de reducción de uso de energía, demanda de agua de riego, y emisiones de gases de efecto invernadero por la adopción de prácticas agrícolas alternativas en sistemas convencionales de producción de maíz en México⁴

Resumen

Los sistemas convencionales de producción de maíz en México dependen fuertemente de los fertilizantes N sintéticos, del diésel para las operaciones agrícolas mecanizadas, y de la electricidad de origen fósil para el bombeo de agua de riego. Asimismo, los sistemas de producción de maíz bajo riego demandan grandes cantidades de agua debido al uso predominante de métodos de riego por gravedad de baja eficiencia. El objetivo del presente estudio es estimar las reducciones potenciales de energía, agua de riego, y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en sistemas convencionales de producción de maíz en México por la adopción de prácticas agrícolas alternativas. Las prácticas agrícolas alternativas examinadas incluyeron el uso de métodos de labranza de conservación, la sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol o una leguminosa como abono verde, la mejora de la eficiencia del uso del fertilizante N sintético, la conversión a sistemas de riego presurizado, y la utilización de riego deficitario. Las reducciones potenciales se estimaron individualmente para cada una de las prácticas alternativas en base a información disponible en fuentes bibliográficas sobre sus probables efectos en las cantidades de insumos agrícolas aplicados y las operaciones agrícolas realizadas. Además de las cifras por hectárea cultivada, se computaron la intensidad energética (*EI*, uso de energía por kg de maíz grano producido), la intensidad de emisiones de GEI (*GEII*, emisiones de GEI por kg de grano producido), y la productividad del agua de riego (*PAR*, cantidad de grano producido por m³ de agua de riego aplicada). En general, la *EI* varió entre -20% y +33%, la *GEII* entre -14% y +14%, y la *PAR* entre +12% y +88% en los distintos escenarios de prácticas agrícolas alternativas. Las reducciones más sustantivas en la *EI* se obtuvieron con la sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol o una leguminosa como abono verde y con la mejora de la eficiencia del uso del fertilizante N sintético. Esta última también condujo a las disminuciones más significativas en la *GEII* en todos los sistemas de producción de maíz. Los incrementos potenciales más notables en la *PAR* se consiguieron con la conversión a riego presurizado y con el cambio a métodos de labranza de conservación. El presente estudio muestra que los impactos potenciales de la introducción de prácticas agrícolas específicas pueden variar según las características de los sistemas agrícolas y también puede servir para orientar sobre posibles vías para minimizar el uso de recursos y los impactos ambientales de la producción convencional de maíz en México.

V.1 Introducción

Los insumos energéticos son esenciales para la producción agrícola moderna. En general, los sistemas convencionales de producción agrícola dependen fuertemente de los insumos derivados

⁴ Basado en el trabajo: Juárez-Hernández, S., Sheinbaum, P., 2018. Energy-, irrigation water-, and greenhouse gas emission-reduction potentials of alternative farming practices in conventional maize systems in Mexico, sometido a la revista *Energy for Sustainable Development*.

de energía de origen fósil debido al uso intensivo de operaciones agrícolas mecanizadas, fertilizantes sintéticos, y pesticidas químicos (Gomiero, Paoletti, y Pimentel, 2008; Hoepfner, Entz, McConkey, Zentner, y Nagy, 2005; Pimentel, Hepperly, Hanson, Douds, y Seidel, 2005). El sector agropecuario absorbe alrededor de 5% - 6% del uso de energía fósil a nivel mundial (Dalgaard, Halber, y Porter, 2001; Giampietro, 2001), y entre 3% - 4% del uso total de energía final en México (SENER, 2017). Los recursos hídricos también son vitales para la producción agrícola. A escala global, las actividades agropecuarias son responsables de aproximadamente 70% de la extracción total de agua dulce, en gran parte por la aplicación de riego a los cultivos (Rothausen y Conway, 2011). En México, el uso de agua en la producción agropecuaria representa cerca de 76% de la extracción total de agua dulce (CONAGUA, 2016). Dependiendo de la fuente de agua, el método de aplicación, y los requerimientos de agua de los cultivos, el riego también puede demandar cantidades importantes de energía (Lal, 2004; Rothausen y Conway, 2011).

Los sistemas modernos de producción agrícola generan asimismo grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Además del cambio de uso de suelo, las principales fuentes de GEI en la actividad agrícola incluyen el consumo de combustibles fósiles en las unidades de producción, la fabricación y el transporte de los insumos agrícolas, y el N_2O emanado de la aplicación de N a los campos de cultivo (Pretty, Ball, Xiaoyun, y Ravindranath, 2002; Smith et al., 2008). A nivel mundial, el sector agropecuario contribuye con aproximadamente 20% de las emisiones totales antropogénicas de GEI (McMichael, Powles, Butler, y Uauy, 2006; Woods, Williams, Hughes, Black, y Murphy, 2010) y con cerca de 12% de las emisiones totales de GEI en México (INECC, 2012). La excesiva dependencia de insumos derivados de energéticos fósiles, el uso ineficiente de los recursos hídricos en el riego agrícola, y la generación de cantidades ingentes de GEI comprometen la sustentabilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas convencionales.

Varios estudios han demostrado que las demandas de energía fósil y agua de riego, así como las emisiones de GEI de los sistemas agrícolas pueden reducirse sensiblemente mediante la adopción de prácticas alternativas de producción (Ali y Talukder, 2008; Gan, Liang, Hamel, Cutforth, y Wang, 2011; Hillier et al., 2009; Khakbazan et al., 2009; Kranz, Eisenhauser, y Retka, 1992; Tuomisto, Hodge, Riordan, y Macdonald, 2012). La adopción de prácticas agrícolas más sustentables es de especial interés para la producción de cultivos que son cruciales desde el punto de vista alimentario.

En México, el maíz (*Zea mays* L.) es el cereal básico de mayor importancia. La superficie sembrada anual con maíz grano es cercana a 7.5 millones de ha (i.e. casi un tercio de la superficie agrícola nacional), predominantemente en condiciones de temporal (alrededor de 83% del total) (SIAP, 2017b). El volumen de producción anual de maíz grano es aproximadamente 23.3 millones de toneladas, repartidas casi en partes iguales entre los sistemas de producción de temporal (alrededor de 58%) y los sistemas de producción de riego (42%) (SIAP, 2017b). La mayoría de la producción corresponde a maíz blanco (SIAP, 2017b), el cual se destina principalmente al consumo humano directo (SIAP, 2017a). Una característica distintiva de la producción de maíz en México es la diversidad de sistemas de producción (Bellon y Hellin, 2011; Montañez y Warman, 1982; Toledo, Carabias, Toledo, y González, 1989), lo cual se traduce en una amplia variedad de prácticas de cultivo, intensidades de uso de insumos agrícolas, y niveles de productividad.

Dependiendo del sistema de producción, el uso total de energía y las emisiones totales de GEI por hectárea sembrada en la producción convencional de maíz grano en México se han estimado entre $2.3 - 40.2 \text{ GJ ha}^{-1}$ y $152.9 - 3,475.8 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente, en gran parte debido a la fabricación y aplicación de fertilizantes sintéticos, el consumo de diésel para las operaciones

agrícolas mecanizadas, y el uso de electricidad de origen fósil para el riego (Juárez-Hernández, Usón, y Sheinbaum, n.d.). En los sistemas de producción de maíz con aplicación de riego, el volumen de agua aplicado fluctúa en el rango de 190 – 580 mm, donde los valores en torno al límite superior corresponden al maíz regado por surcos, el cual concentra la mayor proporción de la superficie de maíz bajo riego (casi 83% del total) (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). Estos patrones de uso de recursos subrayan la necesidad de incorporar prácticas agrícolas más sustentables en el cultivo de maíz en México. Reducciones considerables en el uso de energía, la demanda de agua de riego, y las emisiones de GEI en sistemas convencionales de producción de maíz en distintos lugares alrededor del mundo se han conseguido mediante, por ejemplo, el uso de métodos alternativos de labranza (Sarauski et al., 2014), el empleo de sustitutos de fertilizantes sintéticos (McLaughlin, Hiba, Wall, y King, 2000), el manejo óptimo de los nutrientes suministrados (Alluvione, Moretti, Sacco, y Grignani, 2011), la introducción de rotaciones de cultivo más diversificadas (Ma, Liang, Biswas, Morrison, y McLaughlin, 2012), la conversión a sistemas de riego más eficientes (Jackson, Khan, y Hafeez, 2010), y el perfeccionamiento de las prácticas de riego (Kranz et al., 1992).

Los estudios existentes sobre las posibilidades de ahorro de energía y reducción de emisiones de GEI en los sistemas de producción de maíz en México son escasos y de alcance limitado (Flores-Gallardo, Sifuentes-Ibarra, Flores-Magdaleno, Ojeda-Bustamante, y Ramos-García, 2014; Hennecke et al., 2016; Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, y Unland-Weiss, 2006). Así, el propósito del presente trabajo es estimar las reducciones potenciales en el uso de energía, la demanda de agua de riego, y las emisiones de GEI de los sistemas intensivos convencionales de producción de maíz en México como resultado de la adopción de prácticas agrícolas alternativas.

V.2 Metodología y fuentes de información

V.2.1 Sistemas de producción de maíz

Los sistemas de producción de maíz se eligieron conforme a la tipología desarrollada por (SIAP, 2008), la cual distingue los sistemas agrícolas según (i) la fuente de humedad (i.e. temporal o riego); (ii) el tipo de semilla (i.e. semilla criolla o semilla mejorada); y (iii) la aplicación de fertilizantes sintéticos (i.e. sin o con fertilizantes). Así, los sistemas de producción de maíz seleccionados fueron (i) sistema de producción de maíz de temporal, con semilla criolla y aplicación de fertilizantes sintéticos (sistema TCF); (ii) sistema de producción de maíz de temporal, con semilla mejorada y aplicación de fertilizantes sintéticos (sistema TMF); (iii) sistema de producción de maíz con riego por gravedad, con semilla mejorada y aplicación de fertilizantes sintéticos (sistema GMF); y (iv) sistema de producción de maíz con riego por bombeo (presurizado), con semilla mejorada y aplicación de fertilizantes sintéticos (sistema BMF). En conjunto, estos cuatro sistemas de producción de maíz concentran cerca de 42% de la superficie total de maíz grano en México y son los más intensivos en términos de uso de energía, emisiones de GEI, y requerimientos de agua de riego (Juárez-Hernández et al., n.d.) así que, en principio, ofrecen amplio margen de mejora. El resto de la superficie de maíz se encuentra bajo sistemas de producción con uso limitado de insumos agrícolas y bajos rendimientos ($<2.0 \text{ Mg grano ha}^{-1}$) (Juárez-Hernández et al., n.d.), de modo que las posibilidades de reducir su uso de energía y emisiones de GEI serían escasas, y por ello fueron excluidos del presente análisis. Las características más destacadas de los sistemas de producción de maíz seleccionados se describen a continuación.

V.2.1.1 Sistema de producción TCF

Este sistema de producción de maíz exhibe un nivel intermedio de uso de insumos y maquinaria agrícola, rendimientos de grano entre 1.5 – 3.0 Mg ha⁻¹, y concentra alrededor de 26% de la superficie total de maíz de temporal (FIRA, 2017; Juárez-Hernández et al., n.d.). Los datos agronómicos del sistema convencional de producción TCF en el estado de Puebla (**Tabla V.1**) se usaron para realizar las estimaciones ya que fueron los más completos disponibles para este sistema de producción. Nótese que el estado de Puebla posee la segunda mayor superficie sembrada con maíz bajo el sistema TCF en todo el país (aproximadamente 14%) (Juárez-Hernández et al., n.d.).

Tabla V.1. Operaciones e insumos agrícolas y rendimiento de producción de grano por hectárea del sistema convencional de producción TCF en el estado de Puebla, México, para el ciclo de producción primavera – verano, según (FIRA, 2017; SIAP, 2008).

Operación/insumo	No. de veces/cantidad aplicada	Unidad
Barbecho	Tracción mecánica × 1 ^a	
Rastreo	Tracción mecánica × 1	
Surcado	Tracción mecánica × 1	
Siembra	Tracción mecánica × 1	
Aplicación de herbicidas	Manual × 1 ^b	
Aplicación de fertilizante	Manual × 1 ^c	
Cosecha	Manual × 1 ^d	
Urea (46-00-00)	200.0	[kg]
Fosfato diamónico (18-46-00)	150.0	[kg]
Herbicida	<0.1 ^e	[kg]
Semilla criolla	25.0	[kg]
Rendimiento de grano	3,000.0	[kg]

^a Expresa el número de veces que se realiza la operación dada por hectárea. ^b Requerimientos de trabajo humano de 1.0 jornal, con un jornal igual a ocho horas de trabajo. ^c Requerimientos de trabajo humano de 2.0 jornales. ^d Requerimientos de trabajo humano de 10.5 jornales. ^e Amber 75.

V.2.1.2 Sistema de producción TMF

Este sistema de producción se caracteriza por un uso medio a alto de insumos externos y maquinaria agrícola y rendimientos de grano en el rango de 4.0 – 10 Mg ha⁻¹, al tiempo que acumula aproximadamente 12% de la superficie sembrada total de maíz de temporal (FIRA, 2017; Juárez-Hernández et al., n.d.). Para propósitos de cálculo, se emplearon los datos agronómicos reportados para el sistema convencional de producción TMF en el estado de Jalisco (**Tabla V.2**) dado que éste alberga la mayor superficie sembrada de maíz bajo el sistema de producción TMF (cerca de 37%) (Juárez-Hernández et al., n.d.).

V.2.1.3 Sistema de producción GMF

Este sistema de producción es intensivo en insumos agrícolas y altamente mecanizado, con rendimientos de maíz grano entre 6.0 – 12.0 Mg ha⁻¹, además de ser el sistema de producción con riego dominante en términos de superficie pues acapara casi 52% de la superficie total de maíz bajo riego (FIRA, 2017; Juárez-Hernández et al., n.d.). La mayoría de la superficie bajo el sistema de producción GMF (alrededor de 90%) se abastece con agua superficial (primordialmente presas y ríos), lo cual, aunado al uso de métodos de riego por gravedad, resulta en mínimos requerimientos

de energía para riego, pero elevadas demandas de agua debido a pobres eficiencias de conducción, distribución y aplicación del agua (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). Para estimar los potenciales de ahorro, se usaron los datos agronómicos reportados para el sistema convencional de producción GMF en el estado de Sinaloa (**Tabla V.3**) ya que este estado tiene la superficie sembrada más extensa bajo este sistema de producción (cerca de 60% del total nacional) (Juárez-Hernández et al., n.d.).

Tabla V.2. Operaciones e insumos agrícolas y rendimiento de producción de grano por hectárea del sistema convencional de producción TMF en el estado de Jalisco, México, para el ciclo de producción primavera – verano, según (FIRA, 2017; SIAP, 2008).

Operación/insumo	No. de veces/cantidad aplicada	Unidad
Barbecho	Tracción mecánica × 1 ^a	
Rastreo	Tracción mecánica × 2	
Surcado	Tracción mecánica × 1	
Siembra	Tracción mecánica × 1 ^b	
Aplicación de herbicidas	Manual × 1 ^c	
Aplicación de insecticidas	Tracción mecánica × 1	
Aplicación de fertilizantes	Tracción mecánica × 2 ^d	
Cosecha	Tracción mecánica × 1	
Urea (46-00-00)	300.0	[kg]
Fosfato diamónico (18-46-00)	175.0	[kg]
Cloruro de potasio (00-00-60)	100.0	[kg]
Herbicidas	6.0 ^e	[L]
Insecticidas	1.0 ^f	[L]
	20.0 ^g	[kg]
Semilla mejorada	25.0	[kg]
Rendimiento de grano	7,700.0	[kg]

^a Expresa el número de veces que se realiza la operación dada por hectárea. ^b Incluye requerimientos de trabajo humano de 0.25 jornales para ayudante de siembra, con un jornal igual a ocho horas de trabajo. ^c Requerimientos de trabajo de 1.0 jornal. ^d Aplicación en bandas; incluye requerimientos de trabajo humano de 0.25 jornales para ayudante de fertilización. ^e 2 L de Faena L.S. más 4 L de Gesaprim-Combi. ^f Lorsban. ^g Furadan.

V.2.1.4 Sistema de producción BMF

El nivel de uso de insumos y maquinaria agrícola en este sistema de producción es comparable al del sistema GMF, con la diferencia de que el sistema BMF utiliza riego por bombeo (presurizado), registra rendimientos de grano de entre 8.0 – 15.0 Mg ha⁻¹, y concentra casi 60% de la superficie total de maíz con riego presurizado (FIRA, 2017; Juárez-Hernández et al., n.d.). El sistema de producción BMF depende en alto grado del agua de pozo profundo lo que, junto con el uso de riego presurizado, implica una demanda elevada de energía para riego, aunque al mismo contribuye a una eficiencia alta en la utilización del agua de riego (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). Los datos agronómicos reportados para el sistema convencional de producción BMF en el estado de Zacatecas (**Tabla V.4**) se emplearon para llevar a cabo las estimaciones. Nótese que este estado alberga sólo una porción pequeña de la superficie total bajo el sistema BMF (menos de 2%) (Juárez-Hernández et al., n.d.), sin embargo, fue la entidad con los datos más completos disponibles.

Tabla V.3. Operaciones e insumos agrícolas y rendimiento de producción de grano por hectárea del sistema convencional de producción GMF (riego por surcos) en el estado de Sinaloa, México, para el ciclo de producción otoño – invierno, según (FIRA, 2017; SIAP, 2008).

Operación/insumo	Número de veces/cantidad aplicada	Unidad
Barbecho	Tracción mecánica × 1 ^a	
Rastreo	Tracción mecánica × 3	
Nivelación	Tracción mecánica × 1 ^b	
Bordeo y canalización	Tracción mecánica × 4	
Surcado	Tracción mecánica × 2	
Escarificación	Tracción mecánica × 1	
Limpia de canales	Manual × 1 ^c	
Siembra	Tracción mecánica × 1 ^d	
Aplicación de fertilizantes	Tracción mecánica × 1 ^e	
	Tracción mecánica × 1 ^f	
Cultivo	Tracción mecánica × 1	
Deshierbe	Manual × 1 ^g	
Aplicación de riego	Manual × 1 ^h	
Aplicación de insecticidas	Tracción mecánica × 1 ⁱ	
	Tracción mecánica × 1 ^j	
Cosecha	Tracción mecánica × 1	
Amoniaco anhidro (82-00-00)	300.0	[kg]
Urea (46-00-00)	200.0	[kg]
Fosfato monoamónico (11-52-00)	100.0	[kg]
Insecticidas	2.8 ^k	[L]
Semilla mejorada	40.0	[kg]
Agua de riego	1,002.3 ^l	[mm]
Rendimiento de grano	11,000.0	[kg]

^a Expresa el número de veces que se realiza la operación dada por hectárea. ^b Nivelación menor. ^c Requerimientos de trabajo humano de 0.5 jornales, con un jornal igual a ocho horas de trabajo. ^d Incluye requerimientos de trabajo humano de 0.2 jornales para ayudante de siembra. ^e Aplicación en bandas. ^f Inyección de amoníaco anhidro. ^g Requerimientos de trabajo humano de 1.0 jornal. ^h Requerimientos de trabajo humano de 5.3 jornales. ⁱ Aplicación terrestre. ^j Aplicación aérea. ^k 0.8 L de Semevin más 1 L de Lorsban 480e más 0.5 L de Arribo 200 más 0.5 L de Folícol. ^l Valor estimado (véase la sección 2.7 para detalles sobre el método de estimación).

V.2.2 Estimación del uso de energía

Se contabilizaron los principales usos directos e indirectos de energía. Los usos directos incluyeron el diésel y la electricidad necesarios para las operaciones agrícolas y la aplicación de riego. El uso de diésel en las operaciones agrícolas mecanizadas se calculó en base al tipo y número de operaciones agrícolas realizadas por hectárea y sus respectivos consumos de diésel tomados de la bibliografía (Tabla V.5).

El uso de energía para riego incluyó la electricidad y el diésel para la extracción de agua de pozo profundo y para la operación de los sistemas de riego presurizado, calculados conforme a (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). La energía asociada al trabajo humano fue ignorada pues en una evaluación previa se determinó que contribuye marginalmente al uso total de energía ($\leq 2\%$) en todos los sistemas de producción de maíz seleccionados. Los usos indirectos de energía incluyeron la fabricación y el transporte de los insumos agrícolas, cuya magnitud se determinó a partir de las

cantidades aplicadas por hectárea y los correspondientes equivalentes energéticos tomados de la bibliografía (**Tabla V.6**). El uso indirecto de energía para la fabricación de maquinaria y equipo agrícola y de riego fue ignorado puesto que típicamente constituye una fracción pequeña del uso total de energía por hectárea (Alluvione et al., 2011; Diotto y Irmak, 2016; Juárez-Hernández et al., n.d.). Como medida de la eficiencia energética, se calculó la intensidad energética (EI , uso total de energía por hectárea dividido entre el rendimiento de maíz grano por hectárea) ya que se consideró un indicador más apropiado dado que el grano no se utiliza como insumo energético (Ess, 1990).

Tabla V.4. Operaciones e insumos agrícolas y rendimiento de producción de grano por hectárea del sistema convencional de producción BMF (riego por goteo) en el estado de Zacatecas, México, para el ciclo de producción primavera – verano, según (FIRA, 2017).

Operación/insumo	No. de veces/cantidad aplicada	Unidad
Barbecho	Tracción mecánica × 1 ^a	
Rastreo	Tracción mecánica × 2	
Surcado	Tracción mecánica × 1	
Siembra	Tracción mecánica × 1	
Aplicación de fertilizantes	Tracción mecánica × 2 ^b	
Cultivo	Tracción mecánica × 2	
Aplicación de herbicidas	Tracción mecánica × 1	
Aplicación de insecticidas	Tracción mecánica × 1	
Aplicación de riego	Manual × 1 ^c	
Cosecha	Tracción mecánica × 1	
Sulfato de amonio (21-00-00)	1,000.0	[kg]
Fosfato diamónico (18-46-00)	200.0	[kg]
Urea (46-00-00)	100.0	[kg]
Herbicidas	2.0 ^d	[L]
Insecticidas	2.0 ^e	[L]
	10.0 ^f	[kg]
Semilla mejorada	26.0	[kg]
Agua de riego	345.8 ^g	[mm]
Rendimiento de grano	12,000.0	[kg]

^a Expresa el número de veces que se realiza la operación dada por hectárea. ^b Aplicación en bandas. ^c Requerimientos de trabajo humano de 2.75 jornales, con un jornal igual a ocho horas de trabajo. ^d 1 L de Hierbamina más 1 L de Banvel 1224. ^e 0.9 L de Allectus más 0.25 L de Permetrina más 0.1 L de Denim más 0.75 L de Clorpirifos. ^f Zabra. ^g Valor estimado (véase la sección 2.7 para detalles sobre el método de estimación).

V.2.3 Estimación de las emisiones de GEI

Las emisiones totales de GEI incluyeron el CO₂, N₂O y CH₄ asociados al consumo de diésel y electricidad en las operaciones agrícolas y la aplicación de riego, así como a la fabricación y el transporte de los insumos agrícolas. Estas emisiones se calcularon en base a las cantidades aplicadas por hectárea y los factores de emisión correspondientes (**Tabla V.7**). Las emisiones de GEI embutidas en la maquinaria agrícola y el equipo de riego fueron omitidas. Las emisiones directas e indirectas (i.e. volatilización de NH₃ y escurrimiento de NO₃⁻) de N₂O por la aplicación de N al suelo, así como las emisiones de CO₂ por la hidrólisis de la urea aplicada fueron estimadas siguiendo la metodología TIER 1 del IPCC (IPCC, 2006). Las emisiones indirectas de N₂O debidas al escurrimiento de NO₃⁻ se calcularon sólo para la producción de maíz bajo riego, excepto para riego por goteo.

Tabla V.5. Uso estimado de combustible en las operaciones agrícolas mecanizadas.

Operación agrícola	Uso de combustible	Unidades	Observaciones	Referencia
Barbecho	15.9	[L diésel ha ⁻¹]	Barbecho con arado de discos	(Gordon, n.d.)
Rastreo	7.9	[L diésel ha ⁻¹]	Rastra de discos	(Camargo et al., 2013)
Surcado	5.6	[L diésel ha ⁻¹]	-	(Lora, Ramos, y Fernández, 2015)
Picado de paja	4.7	[L diésel ha ⁻¹]	-	(Gordon, n.d.)
Nivelación	5.0	[L diésel ha ⁻¹]	Nivelación menor	(Boto, Pastrana, y Cepeda, 2005)
Bordeo y canalización	5.6	[L diésel ha ⁻¹]	-	(Lora et al., 2015)
Escarificación	6.7	[L diésel ha ⁻¹]	-	(Camargo et al., 2013)
Siembra	5.7	[L diésel ha ⁻¹]	Siembra convencional	(Masera et al., 1987)
	7.0	[L diésel ha ⁻¹]	Siembra en suelo sin barbechar	(Camargo et al., 2013)
	4.7	[L diésel ha ⁻¹]	Siembra de abono verde	(Camargo et al., 2013)
Aplicación de fertilizantes	5.4	[L diésel ha ⁻¹]	Aplicación en bandas	(Camargo et al., 2013)
	8.0	[L diésel ha ⁻¹]	Inyección de amoníaco anhidro	(Camargo et al., 2013)
Aplicación de estiércol	1.3	[L diésel ha ⁻¹]	Esparcidor de estiércol sólido	(Batta et al., 2015)
Cultivo	4.0	[L diésel ha ⁻¹]	-	(Camargo et al., 2013)
Aplicación de herbicidas	0.9	[L diésel ha ⁻¹]	Aspersor	(Bond y Beard, 1997)
Aplicación de insecticidas	0.9	[L diésel ha ⁻¹]	Aplicación terrestre	(Bond y Beard, 1997)
	1.1	[L queroseno ha ⁻¹]	Aplicación aérea	(Barber y Lucock, 2006)
Cosecha	15.0	[L diésel ha ⁻¹]	Combinada con cabezal para maíz	(Bond y Beard, 1997)

Tabla V.6. Uso estimado de energía en la fabricación y transporte de los insumos agrícolas. Valores tomados de (Juárez-Hernández et al., n.d.) a menos que se indique otra fuente.

Insumo agrícola	Uso de energía en la fabricación	Uso de energía en el transporte	Unidad
Semilla criolla de maíz	14.7	- ^a	[MJ kg ⁻¹]
Semilla mejorada de maíz	45.3	51.6×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Semilla de frijol terciopelo	16.7 ^b	51.6×10^{-2c}	[MJ kg ⁻¹]
Amoniaco anhidro (82-00-00)	42.0	48.3×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Urea (46-00-00)	30.0	92.2×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Sulfato de amonio (21-00-00)	11.0	49.9×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Fosfato diamónico (18-46-00)	19.0	58.0×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Fosfato monoamónico (11-52-00)	16.0	69.1×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Cloruro de potasio (00-00-60)	8.0	73.7×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Herbicidas			
Amber (triasulfuron)	365.0	93.0×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Faena (glifosato)	187.4	108.8×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Gesaprim-combi (atrazina + terbutrina)	120.8	103.2×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Hierbamina (2,4-D)	66.5	108.8×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Banvel (dicamba + 2,4-D)	110.8	101.2×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Insecticidas			
Lorsban (clorpirifos)	112.2	256.1×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Furadan (carbofuran)	34.7	236.3×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Semevin (thiodicarb)	131.1	267.0×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Arrivo (cipermetrina)	136.9	224.5×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Folidol (paration)	104.4	262.3×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Allectus (bifentrina + imidacloprid)	136.9	224.5×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Permetrina	219.9	243.4×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Denim (emamectina benzoate)	132.7	255.0×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Clorpirifos	111.8	252.6×10^{-2}	[MJ L ⁻¹]
Zabra (permetrina)	14.3	236.3×10^{-2}	[MJ kg ⁻¹]
Diésel	42.8 ^d	-	[MJ L ⁻¹]
Queroseno	35.3 ^e	-	[MJ L ⁻¹]
Electricidad	9.9	-	[MJ kWh ⁻¹]

^a Los productores obtienen la semilla de cosechas anteriores de modo que no se requiere de transporte. ^b Tomado de (Adams, 1980). ^c Cálculo propio. ^d Incluye el uso de energía *aguas arriba* (i.e. extracción, fabricación, y transporte del energético primario); el poder calorífico neto se asumió 35.7 MJ L⁻¹. ^e Incluye el uso de energía *aguas arriba*; el poder calorífico neto se asumió 31.1 MJ L⁻¹.

Tabla V.7. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la fabricación y el transporte de los insumos agrícolas. Valores tomados de (Juárez-Hernández et al., n.d.) a menos que se indique otra fuente.

Insumo agrícola	Fabricación			Transporte			Unidad
	[kg CO ₂ unidad ⁻¹]	[kg N ₂ O unidad ⁻¹]	[kg CH ₄ unidad ⁻¹]	[kg CO ₂ unidad ⁻¹]	[kg N ₂ O unidad ⁻¹]	[kg CH ₄ unidad ⁻¹]	
Semilla criolla de maíz	nd	nd	nd	-	-	-	-
Semilla mejorada de maíz	2.2	2.2×10^{-3}	3.8×10^{-2}	3.6×10^{-2}	3.3×10^{-7}	3.0×10^{-5}	[kg]
Semilla de frijol terciopelo ^a	2.2	2.2×10^{-3}	3.8×10^{-2}	3.6×10^{-2}	3.3×10^{-7}	3.0×10^{-5}	[kg]
Amoniaco anhidro (82-00-00)	2.4	1.5×10^{-5}	6.6×10^{-3}	3.4×10^{-2}	3.1×10^{-7}	2.9×10^{-5}	[kg]
Urea (46-00-00)	1.0	1.6×10^{-5}	4.8×10^{-3}	6.8×10^{-2}	6.0×10^{-7}	5.3×10^{-5}	[kg]
Sulfato de amonio (21-00-00)	0.7	5.0×10^{-6}	1.7×10^{-3}	3.6×10^{-2}	3.2×10^{-7}	3.0×10^{-5}	[kg]
Fosfato diamónico (18-46-00)	1.2	1.5×10^{-5}	2.5×10^{-3}	4.2×10^{-2}	3.8×10^{-7}	3.4×10^{-5}	[kg]
Fosfato monoamónico (11-52-00)	1.0	1.5×10^{-5}	2.0×10^{-3}	5.0×10^{-2}	4.5×10^{-7}	4.0×10^{-5}	[kg]
Cloruro de potasio (00-00-60)	0.6	7.7×10^{-6}	9.0×10^{-4}	5.3×10^{-2}	4.8×10^{-7}	4.3×10^{-5}	[kg]
<i>Herbicidas</i>							
Amber (triasulfuron)	24.3	2.9×10^{-4}	3.3×10^{-2}	6.6×10^{-2}	8.6×10^{-7}	5.3×10^{-5}	[kg]
Faena (glifosato)	12.5	1.5×10^{-4}	1.7×10^{-2}	7.7×10^{-2}	1.0×10^{-6}	6.2×10^{-5}	[L]
Gesaprim-combi (atrazina + terbutrina)	8.0	9.5×10^{-5}	1.1×10^{-2}	7.3×10^{-2}	9.5×10^{-7}	5.8×10^{-5}	[L]
Hierbamina (2,4-D)	4.4	5.2×10^{-5}	6.0×10^{-3}	7.7×10^{-2}	1.0×10^{-6}	6.2×10^{-5}	[L]
Banvel (dicamba + 2,4-D)	7.4	8.7×10^{-5}	9.9×10^{-3}	7.2×10^{-2}	9.3×10^{-7}	5.7×10^{-5}	[L]
<i>Insecticidas</i>							
Lorsban (clorpirifos)	7.5	9.5×10^{-5}	1.0×10^{-2}	18.1×10^{-2}	3.8×10^{-6}	1.4×10^{-4}	[L]
Furadan (carbofuran)	2.3	2.9×10^{-5}	3.2×10^{-3}	16.7×10^{-2}	3.5×10^{-6}	1.3×10^{-4}	[kg]
Semevin (thiodicarb)	8.7	1.1×10^{-4}	1.2×10^{-2}	18.8×10^{-2}	4.0×10^{-6}	1.5×10^{-4}	[L]
Arrivo (cipermetrina)	9.1	1.2×10^{-4}	1.3×10^{-2}	15.8×10^{-2}	3.3×10^{-6}	1.2×10^{-4}	[L]
Folidol (paration)	6.9	8.9×10^{-5}	9.3×10^{-3}	18.5×10^{-2}	3.9×10^{-6}	1.4×10^{-4}	[L]
Allectus (bifentrina + imidacloprid)	9.1	1.2×10^{-4}	1.3×10^{-2}	15.8×10^{-2}	3.3×10^{-6}	1.2×10^{-4}	[L]
Permetrina	14.6	1.9×10^{-4}	2.0×10^{-2}	17.2×10^{-2}	3.6×10^{-6}	1.3×10^{-4}	[L]
Denim (emamectina benzoate)	8.8	1.1×10^{-4}	1.2×10^{-2}	16.7×10^{-2}	3.5×10^{-6}	1.3×10^{-4}	[L]
Clorpirifos	7.4	9.5×10^{-5}	1.0×10^{-2}	17.8×10^{-2}	3.8×10^{-6}	1.4×10^{-4}	[L]
Zabra (permetrina)	1.0	1.2×10^{-5}	1.3×10^{-3}	16.7×10^{-2}	3.5×10^{-6}	1.3×10^{-4}	[kg]
Diésel ^b	8.2×10^{-2}	2.9×10^{-5}	7.2×10^{-5}	-	-	-	[MJ]
Queroseno ^b	8.1×10^{-2}	2.1×10^{-6}	6.1×10^{-5}	-	-	-	[MJ]
Electricidad ^c	6.1×10^{-1}	1.3×10^{-3}	2.2×10^{-2}	-	-	-	[kWh]

nd, no disponible. ^a Valores estimados a partir de las emisiones de GEI de la fabricación de semilla mejorada de maíz. ^b Incluye las emisiones de GEI de la extracción, producción, transporte y consumo final. ^c Emisiones de GEI por el consumo de combustibles fósiles (incluyendo las emisiones *aguas arriba* por la extracción, refinación, transporte y distribución de los combustibles fósiles) en la generación de electricidad.

En todos los sistemas convencionales de producción de maíz, se asumió una cantidad de residuos de maíz sobre la superficie de cultivo de 300 kg ha^{-1} (m.s.) (Velázquez et al., 2002). La cantidad de residuos agrícolas bajo la superficie fue estimada a partir de los valores típicos del cociente de residuos bajo la superficie – biomasa total sobre la superficie (0.22) (IPCC, 2006), índice de cosecha (i.e. cociente de la producción de grano por hectárea entre la biomasa total sobre la superficie producida por hectárea) para maíz híbrido (0.5) (Grassini y Cassman, 2012) y maíz criollo (0.4) (Arnés, Antonio, del Val, y Astier, 2013), y del contenido de humedad del grano al momento de la cosecha (25%) (Pimentel, 2004).

Se emplearon valores típicos del contenido de N en los residuos de maíz ($6.0 \times 10^{-3} \text{ kg N kg}^{-1}$ de residuos sobre la superficie y $7.0 \times 10^{-3} \text{ kg N kg}^{-1}$ de residuos bajo la superficie) (IPCC, 2006). Las emisiones y el secuestro de C en el suelo no fueron considerados dado que éstos sólo se observan durante un lapso limitado de tiempo después del cambio en las técnicas de manejo del suelo (Tuomisto et al., 2012). Los potenciales de calentamiento global a 100 años (1 para CO_2 , 298 para N_2O , y 25 para CH_4) (IPCC, 2007) se utilizaron para calcular las emisiones totales en términos de CO_2 equivalente (CO_2e). Adicionalmente, como indicador de eficiencia ambiental, se computó la intensidad de emisiones de GEI (*GEII*, cociente de las emisiones totales de GEI por hectárea entre el rendimiento de grano por hectárea).

V.2.4 Estimación del volumen de agua de riego aplicada

El análisis sobre el uso de agua se limitó al agua para riego puesto que su nivel de utilización afecta directamente los requerimientos de energía y las emisiones de GEI de los sistemas de producción de maíz. El volumen de agua de riego aplicado por hectárea se estimó con el programa CropWat (FAO, 2010), empleando la opción ‘calendarización del riego’ (*irrigation schedule*) conforme a las siguientes consideraciones. Se emplearon los registros climáticos y de precipitación promedio mensuales para un periodo de dos años de los estados de Sinaloa (2008 - 2009) y Zacatecas (2006 – 2007), derivados de (INIFAP, 2017). Se usaron los parámetros de cultivo disponibles por defecto en el programa CropWat para maíz grano. Las fechas de siembra y cosecha se establecieron el 1 de noviembre y 28 de abril, respectivamente, para el sistema de producción GMF en el estado de Sinaloa (periodo total de desarrollo de 179 días) (Ojeda-Bustamante et al., 2006; Sifuentes et al., 2011), y el 15 de mayo y el 15 de noviembre para el sistema de producción BMF en el estado de Zacatecas (periodo total de desarrollo de 184 días) (FIRA, 2017).

Respecto a las propiedades del suelo, se utilizaron valores típicos de un suelo arcilloso – limoso para el sistema GMF (Mendoza-Pérez, Sifuentes-Ibarra, Ojeda-Bustamante, y Macías-Cervantes, 2016; Ojeda-Bustamante et al., 2006) y de un suelo arcilloso medio para el sistema BMF (Medina-García et al., 2003). El contenido inicial de humedad del suelo se fijó en 50% de la humedad total disponible. Las eficiencias de aplicación del agua de riego se asumieron iguales a 45% para el sistema GMF (Sifuentes et al., 2011) y 85% para el sistema BMF (Phocaidés, 2000). Se seleccionaron los criterios de ‘regar en el nivel crítico de reducción de humedad’ (*irrigate at critical depletion*) y ‘recargar a capacidad de campo’ (*refill to soil capacity*) en la opción ‘calendarización del riego’ para estimar los requerimientos brutos de riego. Como indicador de eficiencia del uso de agua de riego, se computó la productividad del agua de riego (*PAR*, rendimiento de grano por hectárea dividido entre el volumen de agua de riego aplicado por hectárea).

V.2.5 Prácticas agrícolas alternativas

Estudios previos revelaron los insumos energéticos y las fuentes de emisiones de GEI principales (Juárez-Hernández et al., n.d.), así como las particularidades del manejo del agua de riego (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018) en los sistemas de producción de maíz aquí examinados. En base a esta información, se revisó la bibliografía relevante a fin de identificar prácticas agrícolas alternativas que podrían reducir el uso de energía, las emisiones de GEI y la demanda de agua de riego. Las prácticas agrícolas alternativas así seleccionadas y las suposiciones planteadas para estimar los correspondientes potenciales de ahorro se describen en párrafos siguientes. Téngase en cuenta que los potenciales de ahorro se obtuvieron como la diferencia entre los valores por hectárea del uso de energía, emisiones de GEI y agua de riego aplicada, así como de la *EI*, *GEI* y *PAR*, calculados para los escenarios convencional y alternativos. Además, es importante mencionar que los potenciales de ahorro se calcularon individualmente para cada una de las practicas alternativas.

V.2.5.1 Adopción de métodos de labranza de conservación

En los sistemas de producción TCF, TMF, y BMF, el método alternativo de labranza fue la labranza cero (ZT) con retención de residuos equivalentes a una cobertura del suelo de 33% después de la siembra. La cantidad correspondiente de residuos (en kg) se determinó conforme a (Velázquez et al., 2002). Las operaciones de barbecho, rastreo, surcado, y cultivo fueron eliminadas. Se añadió un paso de picadora de pajas (con maquinaria) y se supuso que la siembra se realiza con una sembradora para labranza cero. A fin de mantener los rendimientos de grano de la producción convencional, la cantidad de semilla empleada se incrementó 20% (Frye, 1984; Mask, Everest, Mitchell, y Reeves, 1994; Nieuwkoop et al., 1994), la dosis de herbicidas se aumentó 50% (Frye, 1984; Griffith y Parsons, 1983; West y Marland, 2002), y la aplicación de fertilizante N sintético se incrementó a razón de 5 kg N por tonelada de residuo de maíz retenido (Castellanos et al., 2005). Las dosis de aplicación de los fertilizantes P y K sintéticos no fueron modificadas (Dinkins, Jones, y McVay, 2008; Griffith y Parsons, 1983; Rehm, Randall, y Evans, 1993). Asimismo, no se consideró contribución alguna de los residuos de maíz en términos de nutrientes. Debido al potencial incremento de la capacidad de retención de agua del suelo bajo ZT con retención de residuos, el volumen de agua de riego aplicado en el sistema de producción BMF se redujo 25% respecto al aplicado bajo labranza convencional (West y Marland, 2002).

En el sistema de producción GMF, el método alternativo de labranza fue la labranza en camellones (RT) pues es la variante más comúnmente utilizada en campos regados por surcos (Christensen, 2002). La cantidad de residuos de maíz retenidos fue la misma que bajo la ZT. Las operaciones de barbecho, rastreo, y surcado fueron eliminadas. Se incluyó un paso adicional de cultivo (con maquinaria), así como un paso de picadora de pajas (con maquinaria). El método de siembra y la cantidad de semilla utilizada no fueron modificados. La dosis de aplicación de fertilizante N sintético fue ajustada como en la ZT en tanto que las dosis de fertilizantes P y K sintéticos fueron las mismas que bajo manejo convencional. Dado que no se utilizan herbicidas en este sistema de producción, no fue necesario ajuste en este rubro. El volumen de agua de riego aplicado se disminuyó 12% (West y Marland, 2002). Para todos los sistemas de producción, se asumieron los mismos rendimientos de maíz grano de los sistemas convencionales.

V.2.5.2 Sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol

Las reducciones potenciales en el uso de energía y las emisiones de GEI se estimaron considerando que el estiércol sustituye sólo 30% del fertilizante N sintético aplicado por hectárea en los sistemas convencionales. Si bien un porcentaje de sustitución mayor podría resultar en reducciones más sustantivas en el uso de energía y las emisiones de GEI, altas dosis de estiércol suponen dificultades en cuanto a disponibilidad y manejo del estiércol, así como riegos ambientales debido a la eventual acumulación de P, K, y sales en los suelos (Berrada y Halvorson, 2012; Eghball y Power, 1999; Jacobs, 1995b; Joern y Brichford, 1993). De ahí que, sustituir sólo una porción del fertilizante N sintético aplicado se consideró una alternativa más viable. Se supuso que el estiércol utilizado es estiércol sólido de vaca, con un contenido de 4.09 kg de N total, 2.27 kg de $\text{NH}_4\text{-N}$, 1.82 kg de P_2O_5 total, y 4.54 kg de K_2O total por tonelada (Jacobs, 1995b). El aporte efectivo de N del estiércol correspondió al N disponible para las plantas (PAN), el cual se calculó asumiendo (i) un factor de mineralización de 0.25; (ii) una pérdida de 30% del $\text{NH}_4\text{-N}$ por volatilización; y (iii) el N orgánico residual que se mineraliza durante los tres siguientes ciclos de producción posteriores a la aplicación (Jacobs, 1995b; Sutton, Jones, Joern, y Huber, 2001). El P_2O_5 total y el K_2O total en el estiércol se consideraron 100% disponibles para las plantas (Jacobs, 1995b; Joern y Brichford, 1993; Sutton et al., 2001), por lo que se ajustaron las dosis de fertilizantes P y K sintéticos a fin de mantener el mismo suministro de nutrientes que en los sistemas convencionales. No se contabilizaron energía y emisiones de GEI embutidas en el estiércol pues éste se consideró un producto de desecho (Cruse, Liebman, Raman, y Wiedenhoeft, 2010). Para la aplicación del estiércol, se supuso la utilización de una esparcidora mecánica seguido de la incorporación inmediata al suelo durante el barbecho convencional. La distancia de transporte del estiércol se estableció de 2 km (viaje sencillo), con requerimientos de diésel de $0.20 \text{ L ton}^{-1} \text{ km}^{-1}$ (Dalgaard et al., 2001). Si bien la aplicación sostenida de estiércol por largos periodos puede incrementar la capacidad de retención de agua del suelo (Miller, Sweetland, y Chang, 2002), los posibles efectos sobre el volumen de agua de riego aplicado fueron ignorados debido a que se asumió que su magnitud sería marginal dadas las dosis relativamente pequeñas de estiércol. Se mantuvieron los mismos rendimientos de maíz grano que bajo el manejo convencional.

V.2.5.3 Sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde

Se supuso que la leguminosa para abono verde (LGM) se siembra en rotación con el maíz grano, en el periodo de descanso de la tierra, es decir, en el ciclo otoño - invierno (primavera - verano) para maíz cultivado en el ciclo de producción primavera - verano (otoño - invierno). Se emplearon datos reportados para frijol terciopelo (*Mucuna pruriens*) pues es una de las LGM más comúnmente usadas en los sistemas de producción de maíz en México (Eilittä, Sollenberger, Littell, y Harrington, 2003b, 2003a; Ortiz-Ceballos, Aguirre-Rivera, Salgado-García, y Ortiz-Ceballos, 2015). Los insumos para el establecimiento de la LGM incluyeron semilla (28 kg ha^{-1}) (Ortiz-Ceballos et al., 2015), fertilizante P sintético (225 kg ha^{-1} de superfosfato simple) (Chakoma, Manyawu, Gwiriri, Moyo, y Dube, 2015), y diésel para las labores agrícolas necesarias (i.e. aplicación de fertilizantes con esparcidora e incorporación de los mismos al suelo con arado de discos, siembra, y terminación mecánica de la LGM). Sólo se consideró el aporte de N de los residuos de la LGM. La cantidad de biomasa de la LGM sobre la superficie (5.76 y 4.23 Mg ha^{-1} (m.s.) para los ciclos primavera – verano y otoño – invierno, respectivamente) y su contenido de N total (2.68%) fueron tomados de (Ortiz-Ceballos et al., 2015). La cantidad y el contenido de N total de la biomasa bajo la superficie fueron estimados a partir de valores típicos del cociente biomasa sobre la superficie – biomasa bajo la superficie (0.19) y del contenido de N total (0.80%) para residuos de leguminosas según (IPCC, 2006).

El equivalente de fertilizante N sintético de la LGM fue aproximado como la porción del N total de los residuos de la LGM atribuido a la fijación de N_2 atmosférico ($\%N_{dfa}$) (Alluvione, Bertora, Zavattaro, y Grignani, 2010). Los valores reportados del $\%N_{dfa}$ para el frijol terciopelo se encuentran en el rango de 40% - 80% del contenido de N total (Houngnandan, Sanginga, Woomer, Vanlauwe, y van Cleemput, 2000; Kaizzi, Ssali, y Vlek, 2004; Ojiem, Vanlauwe, de Ridder, y Giller, 2007; Okito, Rodrigues, Urquiaga, y Boddey, 2004; Partelli et al., 2011; Silva et al., 2011), de ahí que el $\%N_{dfa}$ se supuso igual a 60% del N total. En caso de ser necesario, el aporte de N de la LGM se complementó con fertilizante N sintético a fin de suministrar la misma cantidad de N que en los sistemas convencionales. Las dosis aplicadas de fertilizantes P y K sintéticos no se modificaron. Por lo tanto, las cantidades totales de nutrientes fueron las mismas que en el escenario convencional. Los posibles efectos en el volumen de agua de riego fueron omitidos debido a la falta de información suficiente para cuantificar el impacto del crecimiento de la LGM en la disponibilidad de agua en el suelo. Como en los casos anteriores, no se consideraron cambios en los rendimientos de producción de maíz.

V.2.5.4 Mejora en la eficiencia del uso del fertilizante N sintético

La eficiencia del uso del fertilizante N sintético (NUE), medida como el factor parcial de productividad del fertilizante N sintético (i.e. PPF_N , grano producido por unidad de fertilizante N aplicado) es aproximadamente 25.21, 45.43, 31.52, y 41.10 kg grano kg^{-1} N aplicado en los sistemas de producción TCF, TMF, GMF, y BMF, respectivamente, en los estados de la República aquí considerados. En comparación, el PPF_N de los sistemas de producción de maíz en los EE.UU. se encuentra entre 44 – 74 kg grano kg^{-1} N aplicado en los sistemas de temporal, y entre 73 – 94 kg grano kg^{-1} N aplicado en los sistemas bajo riego (Dobermann, 2007; Grassini y Cassman, 2012). Estas cifras sugieren que existen gran margen de mejora de la NUE en los sistemas de producción de maíz en México. Así, las reducciones potenciales en el uso de energía y las emisiones de GEI a consecuencia de un eventual incremento de la NUE se estimaron suponiendo una disminución en la cantidad del fertilizante N sintético aplicado a modo de aumentar 20% la PPF_N en todos los sistemas convencionales. Se asumió que este incremento conservador en la NUE sería posible a través de una mejor calibración de la dosis y el tiempo de aplicación del fertilizante N sintético y, por ende, no se contemplaron ajustes adicionales en el resto de los insumos y en el conjunto de las operaciones agrícolas realizadas. Si bien mayores incrementos de la NUE parecen factibles, éstos seguramente demandarían modificaciones profundas en términos del tipo de fertilizantes utilizados, los métodos de aplicación, y las prácticas generales de manejo del cultivo, las cuales son más difíciles de caracterizar empleando únicamente información secundaria. Se asumieron los mismos rendimientos de producción de maíz grano que en los sistemas convencionales.

V.2.5.5 Conversión a riego presurizado

Para el sistema convencional de producción GMF regado por surcos, se estimaron los impactos potenciales en el uso de energía, las emisiones de GEI, y el volumen de agua de riego aplicado de la conversión a riego por aspersión y a riego por goteo. Se asumieron valores típicos de la eficiencia de aplicación (i.e. 75% para riego por aspersión y 85% para riego por goteo) (Phocaidés, 2000) y la presión de operación (3.0 y 1.0 bar, respectivamente, más 20% por pérdidas por fricción) (Daccache, Ciurana, Rodríguez Díaz, y Knox, 2014). Las operaciones agrícolas relacionadas con la preparación del suelo para el riego por surcos (i.e. nivelación del suelo, bordeado y canalización, surcado ($\times 1$), y

limpia de canales) fueron eliminadas. Las cantidades aplicadas de los demás insumos agrícolas y los rendimientos de producción de maíz grano se mantuvieron sin cambios. El sistema de producción BMF fue excluido de este escenario alternativo puesto que dicho sistema utiliza riego por goteo, el cual es un método de riego de alta eficiencia.

V.2.5.6 Aplicación de riego deficitario

Las posibles disminuciones en el uso de energía, las emisiones de GEI, y el volumen de agua de riego aplicado en los sistemas convencionales de producción GMF y BMF por la implementación de riego deficitario (DI) se cuantificaron considerando un DI equivalente a 80% de la demanda total de riego. Los insumos de electricidad y diésel destinados a la aplicación de riego se redujeron en concordancia con el decremento en el volumen de agua de riego aplicado. La penalización en el rendimiento de producción de maíz grano se asumió igual a 10% del rendimiento de maíz grano con riego convencional (Colaizzi, Evett, y Howell, 2011; Mendoza-Pérez et al., 2016; Rudnick et al., 2017; Sifuentes et al., 2011) en ambos sistemas de producción. Las cantidades aplicadas de los demás insumos y las operaciones agrícolas realizadas fueron las mismas que en los sistemas convencionales.

V.2.6 Posibles efectos en los rendimientos de producción de maíz grano

A excepción de la aplicación de DI, para las prácticas agrícolas alternativas se asumió que su adopción no altera los rendimientos de producción de maíz grano alcanzados bajo manejo convencional. Esta simplificación fue necesaria dado que los posibles efectos de dichas prácticas sobre los rendimientos dependen fuertemente de las condiciones particulares del sitio de cultivo, el tipo de planta, y el sistema de producción, al tiempo que esta información específicamente para el maíz en el contexto mexicano es escasa. Para sortear alguna medida esta limitante, se determinó *ceteris paribus* la variación en los rendimientos de maíz grano que cancelaría los incrementos (o decrementos) computados en la *EI*, la *GEI*, y la *PAR* en los distintos escenarios de prácticas alternativas. Los resultados de este análisis en cierta forma mostraron qué tan susceptibles son los potenciales impactos de la introducción de las prácticas alternativas a eventuales cambios en los rendimientos de producción de maíz grano.

V.2.7 Análisis de sensibilidad

Para las distintas prácticas alternativas seleccionadas, se escogieron algunas variables con alta incertidumbre (**Tabla V.8**) a fin de evaluar su influencia en la *EI*, la *GEI*, y la *PAR* calculadas. Los valores originales de este conjunto de variables se cambiaron *ceteris paribus* $\pm 20\%$ para observar el consecuente cambio relativo en la *EI*, la *GEI*, y la *PAR*, y así detectar las variables con mayor influencia. Nótese el escenario de mejora de la NUE fue excluido del análisis de sensibilidad puesto que dicho escenario sólo supuso la reducción en la cantidad de fertilizantes N sintético aplicado sin modificaciones adicionales en los insumos aplicados, las operaciones agrícolas, o los rendimientos de maíz grano.

Tabla V.8. Variables seleccionadas para el análisis de sensibilidad.

Práctica agrícola alternativa ^a	Variables
Adopción de métodos de labranza de conservación	Incremento en las cantidades de fertilizante N sintético, semilla, y herbicidas; cantidad adicional de residuos de maíz retenidos; reducción en el volumen de agua de riego aplicado
Sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol	Nitrógeno disponible en el estiércol; distancia de transporte del estiércol; uso de diésel para la aplicación del estiércol al suelo
Sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde	Insumos agrícolas para el establecimiento del abono verde (i.e. diésel para labores agrícolas, semilla, y fertilizante P sintético); proporción de N fijado del N ₂ atmosférico; volumen de agua de riego aplicado
Conversión a riego presurizado	Eficiencia de aplicación y presión de operación de los sistemas de riego por aspersión y por goteo; eficiencia global del sistema de bombeo
Aplicación de riego deficitario	Penalización en el rendimiento de maíz grano

^a El escenario de mejora en la eficiencia del uso del fertilizante N sintético fue excluido del análisis de sensibilidad dado que dicho escenario sólo supuso la reducción en la cantidad de fertilizante N sintético aplicado sin cambios adicionales en los demás insumos utilizados, en las operaciones agrícolas realizadas, y en los rendimientos de producción de maíz grano.

V.3. Resultados

V.3.1 Reducciones potenciales en el sistema de producción TCF

El uso total de energía por hectárea en el sistema convencional de producción TCF se estimó cercano a 11.00 GJ ha⁻¹, donde los fertilizantes sintéticos representaron casi el 80%, el diésel para las operaciones agrícolas 14%, la semilla 3%, los combustibles para el transporte de insumos 2%, y los pesticidas <1% (**Figura V.1**). Las emisiones totales de GEI por hectárea se calcularon en casi 1,365.04 kg CO₂e ha⁻¹, de las cuales aproximadamente 44% correspondieron a emisiones directas de N₂O, 30% a la fabricación de fertilizantes sintéticos, 11% a emisiones de CO₂ por la aplicación de urea, 9% al consumo de diésel en labores agrícolas, 4% a emisiones indirectas de N₂O, 1% a la quema de combustibles en el transporte de insumos, y <1% a la fabricación de pesticidas (**Figura V.2**).

El cambio a la ZT redujo el uso total de energía por hectárea en alrededor de 2% (-0.17 GJ ha⁻¹) e incrementó las emisiones totales de GEI por hectárea en torno a 6% (+79.79 kg CO₂e ha⁻¹). En este caso, los principales insumos energéticos fueron los fertilizantes sintéticos (ca. 89% del total) y el diésel para labores agrícolas (5%) (**Figura V.1**), mientras que las fuentes de GEI dominantes fueron las emisiones directas de N₂O (49%) y la producción de fertilizantes sintéticos (31%) (**Figura V.2**).

El uso de estiércol como sustituto parcial del fertilizante N sintético disminuyó el uso total de energía por hectárea en casi 16% (-1.74 GJ ha⁻¹) y elevó las emisiones totales de GEI por hectárea en cerca de 4% (+56.11 kg CO₂e ha⁻¹). En este escenario, la mayor parte del uso de energía se asoció a los fertilizantes sintéticos (alrededor de 66% del total) y al diésel para las operaciones agrícolas (25%) (**Figura V.1**), en tanto que las principales fuentes de GEI fueron las emisiones directas de N₂O (51%), la fabricación de fertilizantes sintéticos (20%), y el consumo de diésel en las operaciones agrícolas (13%) (**Figura V.2**).

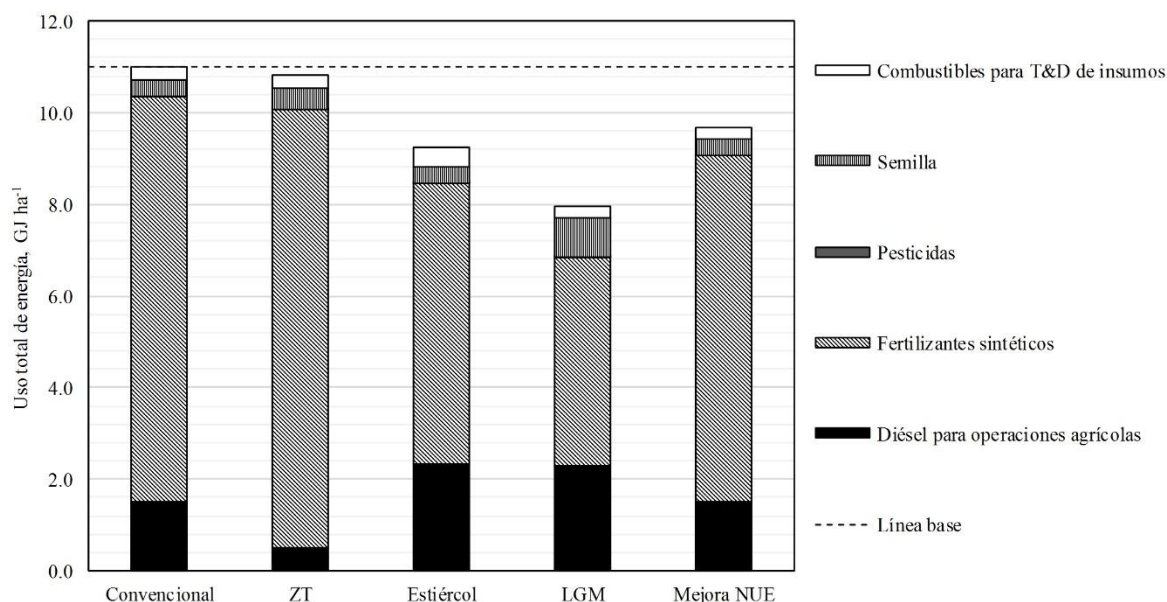


Figura V.1. Uso total de energía por hectárea y contribución de los diferentes insumos energéticos estimados para el sistema de producción de maíz TCF con prácticas agrícolas convencionales (Convencional), adopción de labranza cero (ZT), sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol (Estiércol), sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde (LGM), e incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético (Mejora NUE). T&D, transporte y distribución.

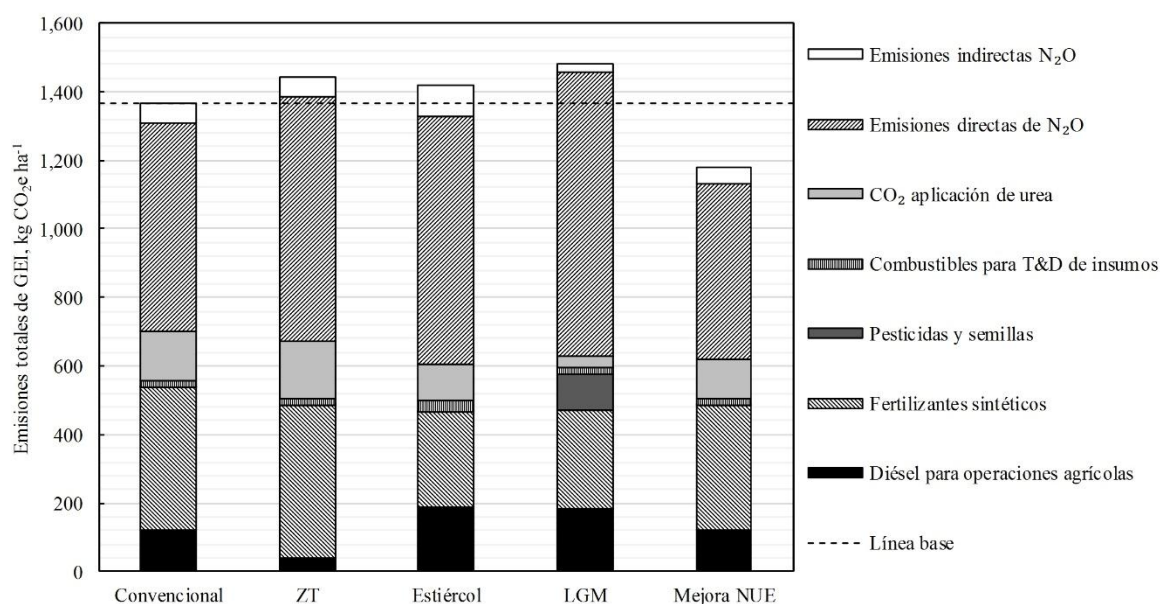


Figura V.2. Emisiones totales de GEI por hectárea y contribución de las diferentes fuentes de emisiones estimadas para el sistema de producción TCF con prácticas agrícolas convencionales (Convencional), adopción de labranza cero (ZT), sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol (Estiércol), sustitución parcial del fertilizante N sintético aplicado con abono verde (LGM), e incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético (Mejora NUE). T&D, transporte y distribución. Las emisiones directas de N₂O incluyen las generadas por la aplicación de N en forma de fertilizantes sintéticos, estiércol, abono verde, y residuos de la planta de maíz. Las emisiones indirectas de N₂O son las generadas por la volatilización del N aplicado.

El reemplazo parcial del fertilizante N sintético con abono verde redujo el uso total de energía por hectárea en alrededor de 28% (-3.05 GJ ha^{-1}) y aumentó las emisiones totales de GEI por hectárea en casi 9% ($+116.48 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$). Con esta práctica alternativa, los mayores aportes de energía fueron en forma de fertilizantes sintéticos (aproximadamente 57% del total), el diésel para operaciones agrícolas (29%), y semilla (11%) (**Figura V.1**), mientras que la mayoría de los GEI se atribuyó a las emisiones directas de N_2O (56%), la fabricación de fertilizantes sintéticos (19%), y el consumo de diésel en las labores agrícolas (12%) (**Figura V.2**).

La mejora en la NUE se tradujo en una reducción del uso total de energía y las emisiones totales de GEI por hectárea de alrededor de 12% (-1.33 GJ ha^{-1}) y 14% ($-186.27 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$), respectivamente. Las contribuciones relativas de los diferentes insumos a los totales calculados por hectárea (**Figuras V.1 y V.2**) fueron similares a las estimadas para el escenario convencional.

V.3.2 Reducciones potenciales en el sistema de producción TMF

El uso total de energía por hectárea en el sistema convencional de producción TMF se estimó en torno a 19.43 GJ ha^{-1} , en el cual los fertilizantes sintéticos participaron con cerca de 68%, el diésel para las operaciones agrícolas 15%, los pesticidas 9%, la semilla 6%, y los combustibles para el transporte y la distribución de insumos 3% (**Figura V.3**). Las emisiones totales de GEI por hectárea se calcularon en aproximadamente $2,292.58 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$, de las cuales alrededor de 39% correspondieron a emisiones directas de N_2O , 27% a fabricación de fertilizantes sintéticos, 10% al consumo de diésel en las operaciones agrícolas, 10% a emisiones de CO_2 por la aplicación de urea, 9% a fabricación de pesticidas y semilla, 3% a emisiones indirectas de N_2O , y 2% al consumo de combustibles fósiles en el transporte y la distribución de los insumos (**Figura V.4**).

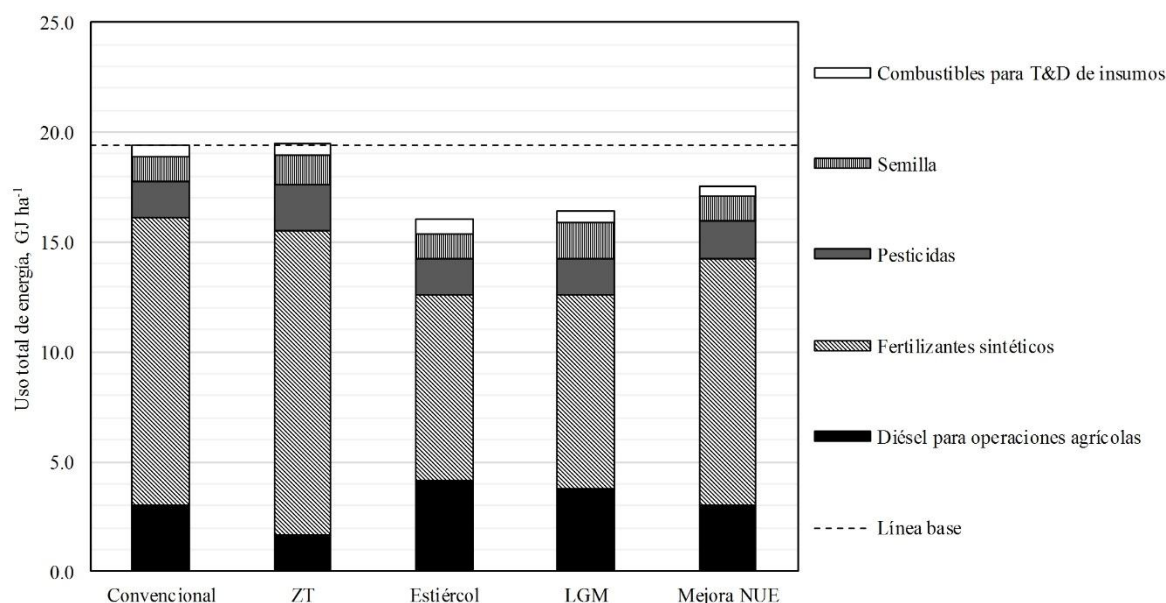


Figura V.3. Uso total de energía por hectárea y contribución de los diferentes insumos energéticos estimados para el sistema de producción de maíz TMF con prácticas agrícolas convencionales (Convencional), adopción de labranza cero (ZT), sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol (Estiércol), sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde (LGM), e incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético (Mejora NUE). T&D, transporte y distribución.

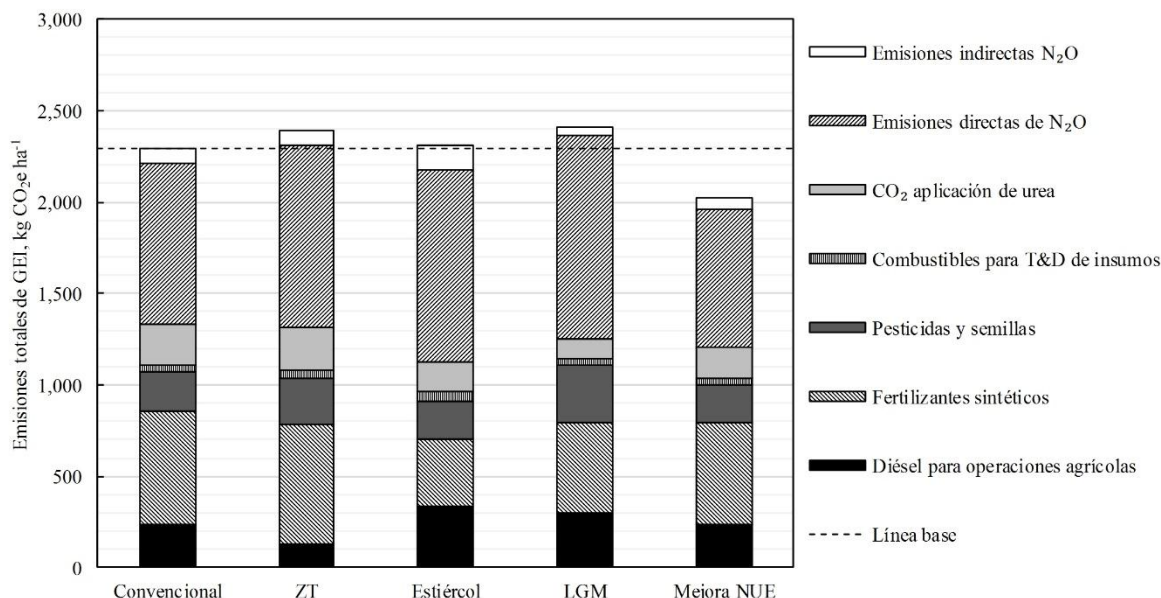


Figura V.4. Emisiones totales de GEI por hectárea y contribución de las diferentes fuentes de emisiones estimadas para el sistema de producción TMF con prácticas agrícolas convencionales (Convencional), adopción de labranza cero (ZT), sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol (Estiércol), sustitución parcial del fertilizante N sintético aplicado con abono verde (LGM), e incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético (Mejora NUE). T&D, transporte y distribución. Las emisiones directas de N₂O incluyen las generadas por la aplicación de N en forma de fertilizantes sintéticos, estiércol, abono verde, y residuos de la planta de maíz. Las emisiones indirectas de N₂O son las generadas por la volatilización del N aplicado.

La introducción de la ZT incrementó el uso total de energía por hectárea en poco menos de 1% (+0.07 GJ ha⁻¹) y las emisiones totales de GEI por hectárea en cerca de 4% (+101.67 kg CO₂e ha⁻¹). Bajo este escenario, los insumos energéticos dominantes fueron los fertilizantes sintéticos (aproximadamente 71% del total) y los pesticidas (11%) (**Figura V.3**), en tanto que la mayoría de los GEI se debieron a las emisiones directas de N₂O (41%), la fabricación de fertilizantes sintéticos (27%), y la producción de pesticidas y semilla (11%) (**Figura V.4**).

La sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol disminuyó el uso total de energía por hectárea en torno a 17% (-3.36 GJ ha⁻¹) y aumentó las emisiones totales de GEI por hectárea en alrededor de 1% (+14.15 kg CO₂e ha⁻¹). En este caso, los principales insumos energéticos fueron los fertilizantes sintéticos (con casi 52% del total) y el diésel para las operaciones agrícolas (26%) (**Figura V.3**), y del lado de las emisiones de GEI, las fuentes primarias fueron las emisiones directas de N₂O (45%), la fabricación de fertilizantes sintéticos (16%), y el consumo de diésel para las labores agrícolas (14%) (**Figura V.4**).

La utilización de abono verde como sustituto parcial del fertilizante N sintético aplicado redujo el uso total de energía por hectárea en alrededor de 16% (-3.05 GJ ha⁻¹) e incrementó las emisiones totales de GEI por hectárea en cerca de 5% (+116.03 kg CO₂e ha⁻¹). Con este cambio, la mayor parte de la energía utilizada provino de los fertilizantes sintéticos (aproximadamente 54% del total), el diésel para las operaciones agrícolas (23%), y las semillas (10%) (**Figura V.3**), en tanto que las principales fuentes de GEI incluyeron las emisiones directas de N₂O (46%), la fabricación de

fertilizantes sintéticos (20%), la producción de pesticidas y semillas (13%), y el consumo de diésel en las labores agrícolas (13%) (**Figura V.4**).

El incremento de la NUE redujo el uso total de energía por hectárea en alrededor de 10% (-1.90 GJ ha^{-1}) y las emisiones totales de GEI por hectárea en cerca de 12% ($-265.20 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$). En este escenario, las participaciones relativas de los distintos componentes considerados fueron semejantes a las computas para el sistema convencional (**Figuras V.3 y V.4**).

V.3.3 Reducciones potenciales en el sistema de producción GMF

Bajo manejo convencional, el uso total de energía por hectárea en el sistema de producción GMF se calculó en aproximadamente 28.23 GJ ha^{-1} , con alrededor de 72% asociado a los fertilizantes sintéticos, 19% al diésel para las labores agrícolas, 6% a la semilla, 2% a los combustibles para el transporte y la distribución de los insumos, 1% a los pesticidas, y <1% a la electricidad y diésel para la aplicación de riego (**Figura V.5**). Las emisiones totales de GEI por hectárea se estimaron en cerca de $4,201.27 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$, con aproximadamente 42% atribuidas a las emisiones directas de N_2O , 26% de la fabricación de fertilizantes sintéticos, 13% a las emisiones indirectas de N_2O , 10% al consumo de diésel en las labores agrícolas, 4% a la producción de pesticidas y semilla, 3% a las emisiones de CO_2 por el uso de urea, 1% al consumo de combustibles fósiles en el transporte y la distribución de los insumos, y <1% al consumo de electricidad y diésel para la aplicación de riego (**Figura V.6**).

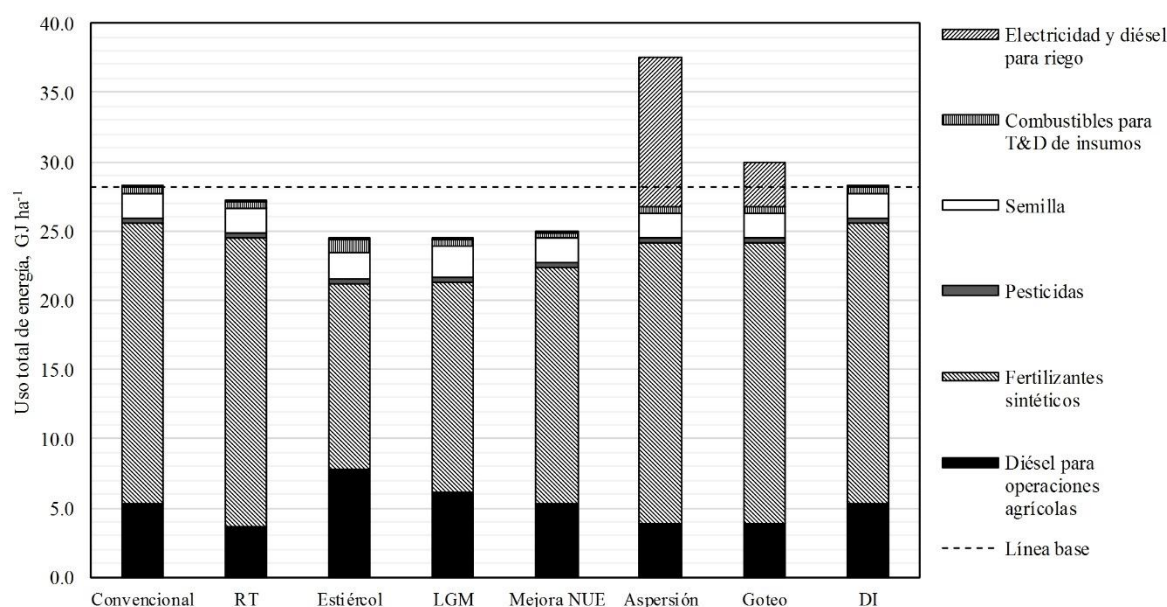


Figura V.5. Uso total de energía por hectárea y contribución de los diferentes insumos energéticos estimados para el sistema de producción de maíz GMF con prácticas agrícolas convencionales (Convencional), adopción de labranza en camellones (RT), sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol (Estiércol), sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde (LGM), incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético (Mejora NUE), conversión a riego por aspersión (Aspersión), conversión a riego por goteo (Goteo), y aplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego (DI). T&D, transporte y distribución.

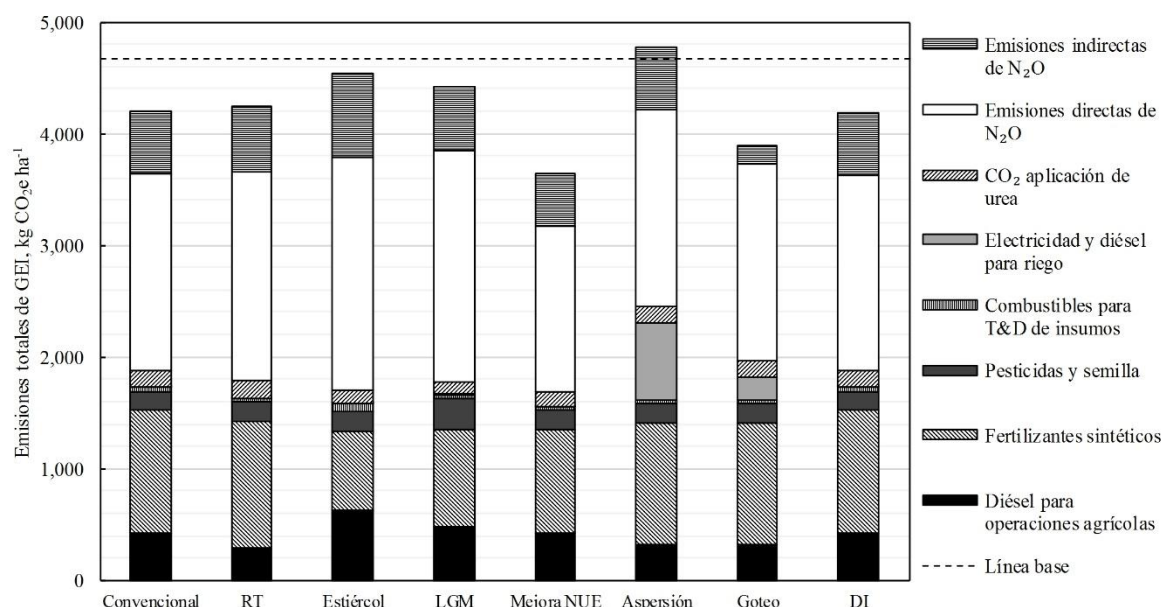


Figura V.6. Emisiones totales de GEI por hectárea y contribución de las diferentes fuentes de emisiones estimadas para el sistema de producción GMF con prácticas agrícolas convencionales (Convencional), adopción de labranza en camellones (RT), sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol (Estiércol), sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde (LGM), incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético (Mejora NUE), conversión a riego por aspersión (Aspersión), conversión a riego por goteo (Goteo), y aplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego (DI). T&D, transporte y distribución. Las emisiones directas de N₂O incluyen las generadas por la aplicación de N en forma de fertilizantes sintéticos, estiércol, abono verde, y residuos de la planta de maíz. Las emisiones indirectas de N₂O incluyen las generadas por la volatilización y el escurrimiento del N aplicado, excepto en el escenario *Goteo*, en el cual sólo se contabilizan las emisiones por la volatilización del N aplicado.

La introducción de la RT condujo a un descenso en el uso total de energía por hectárea de alrededor de 4% (-1.07 GJ ha⁻¹), un aumento en las emisiones totales de GEI por hectárea de casi 1% (+39.30 kg CO₂e ha⁻¹), y una reducción en el volumen de agua de riego aplicado por hectárea de 12% (-120.28 mm). En este escenario alternativo, principales insumos energéticos fueron los fertilizantes sintéticos (casi 76% del total) y el diésel para las operaciones agrícolas (13%) (**Figura V.5**), en tanto que las principales fuentes de GEI fueron las emisiones directas de N₂O (44%), la fabricación de fertilizantes sintéticos (27%), y las emisiones indirectas de N₂O (14%) (**Figura V.6**).

Con el uso de estiércol como sustituto parcial del fertilizante N sintético se redujo el uso total de energía por hectárea en cerca de 13% (-3.72 GJ ha⁻¹) y se incrementaron las emisiones totales de GEI por hectárea en alrededor de 8% (+335.88 kg CO₂e ha⁻¹). En este caso, el mayor aporte de energía provino de los fertilizantes sintéticos (en torno a 55% del total) y el diésel para las labores agrícolas (32%) (**Figura V.5**), mientras que la mayoría de los GEI se debió a las emisiones directas de N₂O (46%), las emisiones indirectas de N₂O (17%), la fabricación de fertilizantes sintéticos (16%), y el consumo de diésel en las operaciones agrícolas (14%) (**Figura V.6**).

La utilización de abono verde como reemplazo parcial del fertilizante N sintético disminuyó el uso total de energía por hectárea en aproximadamente 13% (-3.70 GJ ha⁻¹) y aumentó las emisiones totales de GEI por hectárea en casi 5% (+223.29 kg CO₂e ha⁻¹). En este escenario, los insumos energéticos principales fueron los fertilizantes sintéticos (alrededor de 62% del total) y el diésel para

las operaciones agrícolas (25%) (**Figura V.5**), en tanto que las fuentes de GEI más significativas fueron las emisiones directas de N_2O (47%), la producción de fertilizantes sintéticos (19%), las emisiones indirectas de N_2O (13%), y el consumo de diésel en las labores agrícolas (11%) (**Figura V.6**).

El aumento en la NUE se tradujo en una baja en el uso total de energía por hectárea y en las emisiones totales de GEI por hectárea de casi 12% (-3.27 GJ ha^{-1}) y 13% ($-562.07 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$), respectivamente. Las contribuciones relativas de los diferentes insumos (**Figuras V.5 y V.6**) fueron comparables a la estimadas para el escenario convencional.

La conversión a riego por aspersión incrementó el uso total de energía por hectárea en cerca de 33% ($+9.28 \text{ GJ ha}^{-1}$) y las emisiones totales de GEI por hectárea en alrededor de 14% ($+577.40 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$) al tiempo que disminuyó el volumen de agua de riego aplicado en casi 40% (-400.93 mm). En este caso, la mayor parte de la energía usada se debió a los fertilizantes sintéticos (alrededor de 54% del total) y al uso de electricidad y diésel para riego (29%) (**Figura V.5**) en tanto que las fuentes principales de GEI fueron las emisiones directas de N_2O (37%), la fabricación de fertilizantes sintéticos (23%), el consumo de electricidad y diésel para riego (15%), y las emisiones indirectas de N_2O (12%) (**Figura V.6**).

La conversión a riego por goteo aumentó el uso total de energía por hectárea en alrededor de 6% ($+1.69 \text{ GJ ha}^{-1}$) así como también redujo las emisiones totales de GEI por hectárea en casi 7% ($-308.71 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$), y el volumen de agua de riego aplicado en aproximadamente 47% (-471.68 mm). Bajo este escenario, los insumos energéticos más importantes fueron los fertilizantes sintéticos (alrededor de 68% del total), el diésel para las operaciones agrícolas (13%), y la electricidad y el diésel para la aplicación de riego (11%) (**Figura V.5**), mientras que la mayoría de los GEI se originaron por las emisiones directas de N_2O (45%), la fabricación de fertilizantes sintéticos (28%), y el consumo de diésel en las labores agrícolas mecanizadas (8%) (**Figura V.6**).

La utilización de DI redujo el uso total de energía por hectárea en menos de 1% (-0.02 GJ ha^{-1}), las emisiones totales de GEI por hectárea en menos de 1% ($-15.97 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$), y el volumen de agua de riego aplicado en 20% (-200.46 mm). Las aportaciones relativas de los insumos al uso total de energía (**Figura V.5**) y a las emisiones totales de GEI (**Figura V.6**) fueron semejantes a las estimadas para el sistema bajo manejo convencional.

V.3.4 Reducciones potenciales en el sistema de producción BMF

En el sistema convencional de producción BMF, el uso total de energía por hectárea se estimó en aproximadamente 46.61 GJ ha^{-1} , donde la electricidad y diésel para el riego concentraron alrededor de 49%, los fertilizantes sintéticos 38%, el diésel para las operaciones agrícolas 7%, la semilla 3%, los combustibles para el transporte y la distribución de los insumos 2%, y los pesticidas 1% (**Figura V.7**). De manera similar, las emisiones totales de GEI por hectárea se estimaron en torno a $4,716.98 \text{ kg CO}_2\text{e ha}^{-1}$, en las cuales las emisiones directas de N_2O constituyeron alrededor de 32%, el consumo de electricidad y diésel para el riego 31%, la fabricación de fertilizantes sintéticos 22%, el consumo de diésel en las labores agrícolas 6%, la producción de pesticidas y semilla 3%, las emisiones indirectas de N_2O 3%, las emisiones de CO_2 por la aplicación de urea 2%, y el consumo de combustibles fósiles en el transporte de los insumos 1% (**Figura V.8**).

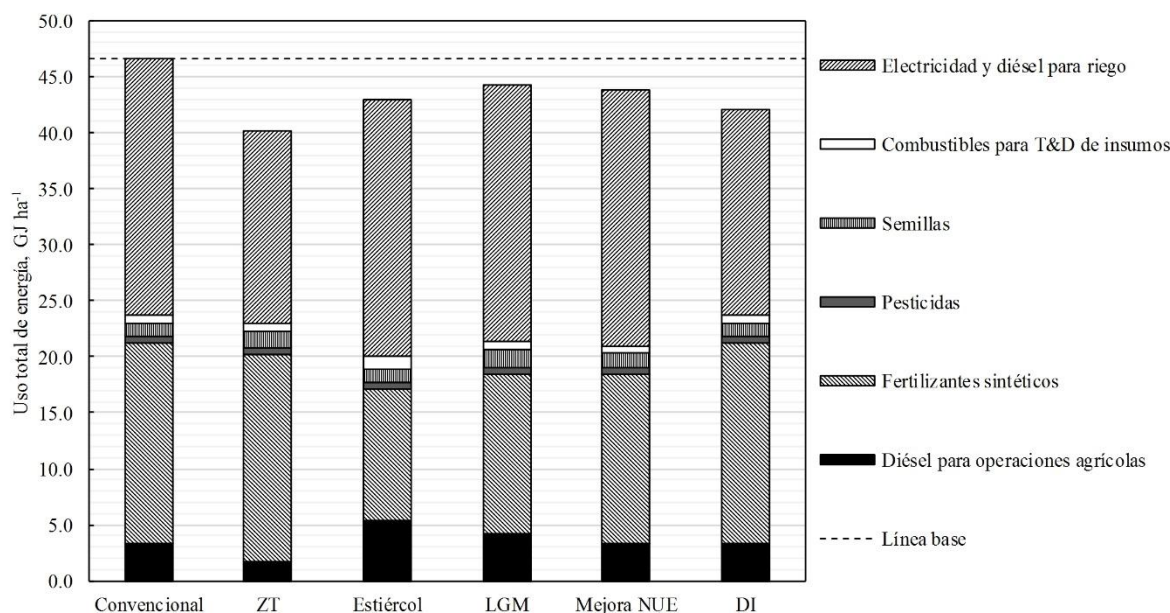


Figura V.7. Uso total de energía por hectárea y contribución de los diferentes insumos energéticos estimados para el sistema de producción de maíz BMF con prácticas agrícolas convencionales (Convencional), adopción de labranza cero (ZT), sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol (Estiércol), sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde (LGM), incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético (Mejora NUE), y aplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego (DI). T&D, transporte y distribución.

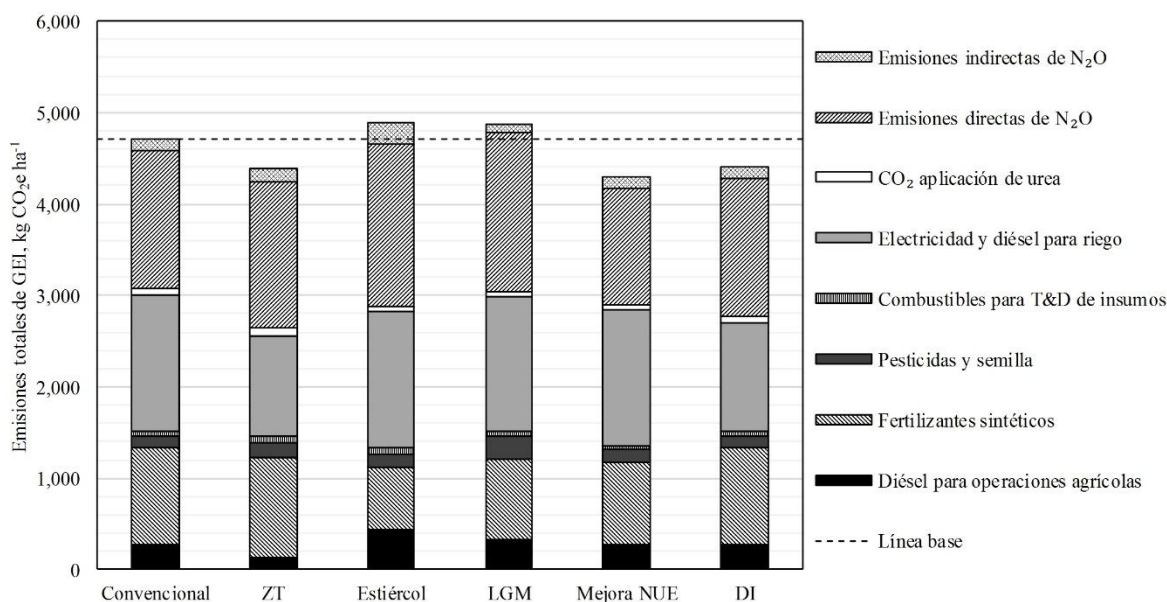


Figura V.8. Emisiones totales de GEI por hectárea y contribución de las diferentes fuentes de emisiones estimadas para el sistema de producción BMF con prácticas agrícolas convencionales (Convencional), adopción de labranza cero (ZT), sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol (Estiércol), sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde (LGM), incremento de 20% en la eficiencia del uso de fertilizante N sintético (Mejora NUE), y aplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego (DI). T&D, transporte y distribución. Las emisiones directas de N₂O incluyen las generadas por

la aplicación de N en forma de fertilizantes sintéticos, estiércol, abono verde, y residuos de la planta de maíz. Las emisiones indirectas de N₂O son las generadas por la volatilización del N aplicado.

La conversión a ZT disminuyó el uso total de energía por hectárea en cerca de 14% (-6.41 GJ ha⁻¹), las emisiones totales de GEI por hectárea en 7% (-321.89 kg CO₂e ha⁻¹), y el volumen de agua de riego aplicado en 25% (-86.44 mm). En este escenario, la mayor parte de la energía utilizada estuvo asociada a los fertilizantes sintéticos (aproximadamente 46% del total) y la electricidad y diésel para el riego (43%) (**Figura V.7**), en tanto que las fuentes primarias de GEI fueron las emisiones directas de N₂O (37%), el consumo de electricidad y diésel para el riego (25%), y la producción de fertilizantes sintéticos (25%) (**Figura V.8**).

Mediante el reemplazo parcial del fertilizante N sintético con estiércol se obtuvo una reducción en el uso total de energía por hectárea cercana a 8% (-3.64 GJ ha⁻¹) y un incremento en las emisiones totales de GEI por hectárea de casi 4% (+174.44 kg CO₂e ha⁻¹). En este caso, el grueso de la energía usada fue suministrado vía la electricidad y el diésel para el riego (alrededor de 53% del total), los fertilizantes sintéticos (27%), y el diésel para las labores agrícolas (13%) (**Figura V.7**), mientras que la mayoría de los GEI se debieron a las emisiones directas de N₂O (36%), al consumo de electricidad y diésel para el riego (30%), y a la fabricación de fertilizantes sintéticos (14%) (**Figura V.8**).

La sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde resultó en un descenso en el uso total de energía por hectárea de casi 5% (-2.32 GJ ha⁻¹) y un aumento en las emisiones totales de GEI por hectárea de alrededor de 3% (+160.21 kg CO₂e ha⁻¹). Como insumos energéticos dominantes figuraron la electricidad y el diésel para el riego (cerca de 52% del total), los fertilizantes sintéticos (32%), y el diésel para las operaciones agrícolas (9%) (**Figura V.7**), y como fuentes principales de GEI aparecieron las emisiones directas de N₂O (35%), el consumo de electricidad y diésel para el riego (30%), y la producción de los fertilizantes sintéticos (18%) (**Figura V.8**).

Con la mejora en la NUE se consiguió una disminución en el uso total de energía por hectárea y las emisiones totales de GEI por hectárea de aproximadamente 6% (-2.78 GJ ha⁻¹) y 9% (-427.39 kg CO₂e ha⁻¹), respectivamente. Las participaciones relativas de los distintos insumos en los totales (**Figuras V.7 y V.8**) asemejaron las calculadas para el escenario convencional.

El empleo de DI causó una reducción en el uso total de energía por hectárea de casi 10% (-4.58 GJ ha⁻¹), en las emisiones totales de GEI por hectárea de 7% (-308.74 kg CO₂e ha⁻¹), y en el volumen de agua de riego aplicado de 20% (-69.15 mm). En este caso, los principales insumos energéticos fueron la electricidad y el diésel para el riego (cerca de 44% del total) y los fertilizantes sintéticos (42%) (**Figura V.7**), y las fuentes primarias de GEI fueron las emisiones directas de N₂O (34%), el consumo de electricidad y diésel para el riego (27%), y la fabricación de fertilizantes sintéticos (24%) (**Figura V.8**).

Los valores calculados de la *EI*, la *GEI*, y la *PAR* en los escenarios convencional y de prácticas alternativas para cada uno de los sistemas de producción de maíz seleccionados, se presentan en la **Tabla V.9**. Las variaciones en los rendimientos de producción de maíz grano que cancelarían los incrementos (decrementos) en dichos indicadores atribuidos a la adopción de las distintas prácticas agrícolas alternativas se muestran en la **Tabla V.10**. Los resultados del análisis de sensibilidad se encuentran en las **Tablas V.11 – V.13**.

Tabla V.9. Intensidad energética (*EI*), intensidad de emisiones de GEI (*GEII*), y productividad del agua de riego (*PAR*) estimadas para los sistemas de producción de maíz seleccionados en los escenarios convencional y de prácticas alternativas.

	<i>EI</i> [GJ Mg ⁻¹ grano]	<i>GEII</i> [kg CO ₂ e Mg ⁻¹ grano]	<i>PAR</i> [kg grano m ⁻³ riego aplicado]
<i>Sistema de producción TCF</i>			
Convencional	3.67	455.01	-
Labranza cero ^a	3.61	481.61	-
Estiércol ^b	3.08	473.72	-
Abono verde ^c	2.65	493.84	-
Mejora NUE ^d	3.22	392.92	-
<i>Sistema de producción TMF</i>			
Convencional	2.52	297.74	-
Labranza cero	2.53	310.94	-
Estiércol	2.09	299.58	-
Abono verde	2.13	312.81	-
Mejora NUE	2.28	263.30	-
<i>Sistema de producción GMF</i>			
Convencional	2.57	381.93	1.10
Labranza en camellones ^e	2.47	385.51	1.25
Estiércol	2.23	412.47	1.10
Abono verde	2.23	402.23	1.10
Mejora NUE	2.27	330.84	1.10
Riego por aspersión ^f	3.41	434.42	1.83
Riego por goteo ^g	2.72	353.87	2.07
Riego deficitario ^h	2.85	422.76	1.23
<i>Sistema de producción BMF</i>			
Convencional	3.88	393.08	3.47
Labranza cero	3.35	366.26	4.63
Estiércol	3.58	407.62	3.47
Abono verde	3.69	406.43	3.47
Mejora NUE	3.65	357.47	3.47
Riego deficitario	3.89	408.17	3.90

^a Adopción de labranza cero con retención de residuos agrícolas. ^b Sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol. ^c Sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde. ^d Aumento de 20% en la eficiencia del uso del fertilizante N sintético. ^e Adopción de labranza en camellones con retención de residuos agrícolas. ^f Conversión a riego por aspersión. ^g Conversión a riego por goteo. ^h Aplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego.

V.4. Discusión

En general, el cambio a ZT/RT tuvo impactos modestos en el uso total de energía y las emisiones totales de GEI por hectárea sembrada. En comparación con la labranza convencional, los requerimientos de diésel para labores agrícolas se redujeron entre 32% (sistema GMF) y 67% (sistema TCF), coincidiendo con lo reportado en estudios similares (entre 10% - 60% menos consumo de diésel) (Barut, Ertekin, y Karaagac, 2011; Parihar et al., 2018; Sarauskis et al., 2014). No obstante,

los ahorros en el consumo de diésel fueron casi anulados por los aumentos en las cantidades de fertilizante N sintético, semilla de maíz, y herbicidas químicos necesarios para mantener los mismos rendimientos de producción de grano que bajo la labranza convencional. De igual forma, la reducción en las emisiones de GEI por el menor consumo de diésel fue más que compensada por las emisiones adicionales asociadas al aumento en los insumos aplicados y los residuos agrícolas retenidos.

Tabla V.10. Variación (%) en los rendimientos de producción de maíz grano por hectárea necesaria para cancelar los incrementos (decrementos) en la intensidad energética (*EI*), la intensidad de emisiones de GEI (*GEII*), y la productividad del agua de riego (*PAR*) en los diferentes escenarios de prácticas agrícolas alternativas.^a

	<i>EI</i>	<i>GHGI</i>	<i>IWP</i>
<i>Sistema de producción TCF</i>			
Labranza cero ^b	-2	+6	-
Estiércol ^c	-16	+4	-
Abono verde ^d	-28	+9	-
Mejora NUE ^e	-12	-14	-
<i>Sistema de producción TMF</i>			
Labranza cero	<+1	+4	-
Estiércol	-17	+1	-
Abono verde	-16	+5	-
Mejora NUE	-10	-12	-
<i>Sistema de producción GMF</i>			
Labranza en camellones ^f	-4	+1	-12
Estiércol	-13	+8	-
Abono verde	-13	+5	-
Mejora NUE	-12	-14	-
Riego por aspersión ^g	+33	+14	-40
Riego por goteo ^h	+6	-8	-47
Riego deficitario ⁱ	+11	+11	-11
<i>Sistema de producción BMF</i>			
Labranza cero	-14	-7	-25
Estiércol	-8	+4	-
Abono verde	-5	+3	-
Mejora NUE	-6	-9	-
Riego deficitario	<+1	+4	-11

^aVariación porcentual respecto a los rendimientos de producción asumidos en cada escenario. ^bAdopción de labranza cero con retención de residuos agrícolas. ^cSustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol. ^dSustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde. ^eAumento de 20% en la eficiencia del uso del fertilizante N sintético. ^fAdopción de labranza en camellones con retención de residuos agrícolas. ^gConversión a riego por aspersión. ^hConversión a riego por goteo. ⁱAplicación de riego deficitario equivalente a 80% de la demanda total de riego.

Por lo tanto, el impacto neto en el uso total de energía y las emisiones totales de GEI fue modesto. Otros estudios reportan resultados similares (ahorros en el uso total de energía de 3% - 11% y reducciones en las emisiones totales de GEI de 3%, respecto al uso de labranza convencional) (Camargo, Ryan, y Richard, 2013; Parihar et al., 2018; Sarauskis et al., 2014).

Tabla V.11. Resultados del análisis de sensibilidad de la intensidad energética (EI) de los sistemas de producción de maíz a variables seleccionadas.^a

Práctica agrícola alternativa	Variable	Sistema de producción de maíz ^b							
		TCF		TMF		GMF		BMF	
		-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%
Adopción de métodos de labranza de conservación	Incremento en la cantidad de fertilizante N sintético	-1.39	1.39	-0.77	0.77	-0.46	0.46	-0.32	0.32
	Incremento en la cantidad de semilla de maíz	-0.14	0.14	-0.23	0.23	- ^c	- ^c	-0.12	0.12
	Incremento en la cantidad de herbicidas	<-0.01	<0.01	-0.44	0.44	- ^d	- ^d	-0.06	0.06
	Cantidad adicional de residuos agrícolas retenidos	-1.21	1.21	-0.67	0.67	-0.40	0.40	-0.28	0.28
	Reducción en el volumen de agua de riego aplicado	-	-	-	-	0.01	-0.01	2.85	-2.85
Sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol	Nitrógeno disponible para las plantas en el estiércol	1.77	-1.18	1.45	-0.97	3.26	-2.17	0.79	-0.52
	Distancia de transporte del estiércol	-0.54	0.54	-0.44	0.44	-0.60	0.60	-0.29	0.29
	Uso de diésel para la aplicación del estiércol al suelo	-1.81	1.81	-1.49	1.49	-2.01	2.01	-0.96	0.96
Sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde	Uso de diésel en las operaciones agrícolas	-2.01	2.01	-0.98	0.98	-0.65	0.65	-0.36	0.36
	Uso de semilla del abono verde	-1.22	1.22	-0.59	0.59	-0.39	0.39	-0.22	0.22
	Fertilizante P sintético para el abono verde	-1.24	1.24	-0.60	0.60	-0.40	0.40	-0.22	0.22
	Proporción de N fijado del N ₂ atmosférico	12.16	-12.16	5.90	-5.90	4.47	-4.47	1.85	-1.85
	Volumen de agua de riego aplicado	-	-	-	-	-0.09	0.09	-10.35	10.35
Conversión a riego por aspersión	Eficiencia de aplicación	-	-	-	-	7.19	-4.80	-	-
	Presión de operación	-	-	-	-	-5.73	5.73	-	-
	Eficiencia global del sistema de bombeo	-	-	-	-	7.19	-4.80	-	-
Conversión a riego por goteo	Eficiencia de aplicación	-	-	-	-	2.68	-1.78	-	-
	Presión de operación	-	-	-	-	-2.11	2.11	-	-
	Eficiencia global del sistema de bombeo	-	-	-	-	2.68	-1.78	-	-
Aplicación de riego deficitario	Penalización en el rendimiento de maíz grano	-	-	-	-	-2.17	2.27	-2.17	2.27

^a El escenario de mejora en la eficiencia del uso del fertilizante N sintético fue excluido dado que dicho escenario sólo supuso la reducción en la cantidad de fertilizante N sintético aplicado sin cambios adicionales en los demás insumos utilizados, en las operaciones agrícolas realizadas, y en los rendimientos de maíz grano. ^b T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^c El método de labranza de conservación fue labranza en camellones con la misma cantidad de semilla que la labranza convencional. ^d No se reporta la aplicación de herbicidas químicos.

Tabla V.12. Resultados del análisis de sensibilidad de la intensidad de emisiones de GEI (*GEII*) de los sistemas de producción de maíz a variables seleccionadas.^a

Práctica agrícola alternativa	Variable	Sistemas de producción de maíz ^b							
		TCF		TMF		GMF		BMF	
		-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%
Adopción de métodos de labranza de conservación	Incremento en la cantidad de fertilizante N sintético	-1.46	1.46	-0.88	0.88	-0.51	0.51	-0.45	0.45
	Incremento en la cantidad de semilla de maíz	- ^c	- ^c	-0.16	0.16	- ^d	- ^d	-0.09	0.09
	Incremento en la cantidad de herbicidas	<-0.01	<0.01	-0.25	0.25	- ^e	- ^e	-0.04	0.04
	Cantidad adicional de residuos de maíz retenidos	-2.02	2.02	-1.22	1.22	-0.76	0.76	-0.64	0.64
	Reducción en el volumen de agua de riego aplicado	-	-	-	-	<0.01	<-0.01	1.68	-1.68
Sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol	Nitrógeno disponible para las plantas en el estiércol	6.87	-4.58	6.03	-4.02	7.82	-5.21	4.82	-3.21
	Distancia de transporte del estiércol	-0.26	0.26	-0.23	0.23	-0.24	0.24	-0.18	0.18
	Uso de diésel para la aplicación del estiércol al suelo	-0.94	0.94	-0.83	0.83	-0.86	0.86	-0.67	0.67
Sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde	Uso de diésel en las operaciones agrícolas	-0.86	0.86	-0.53	0.53	-0.29	0.29	-0.26	0.26
	Uso de semilla del abono verde	-1.45	1.45	-0.89	0.89	-0.49	0.49	-0.44	0.44
	Fertilizante P sintético para el abono verde	-0.79	0.79	-0.48	0.48	-0.26	0.26	-0.24	0.24
	Proporción de N fijado del N ₂ atmosférico	9.10	-9.10	5.60	-5.60	4.26	-4.26	2.58	-2.58
	Volumen de agua de riego aplicado	-	-	-	-	-0.03	0.03	-6.06	6.06
Conversión a riego por aspersión	Eficiencia de aplicación	-	-	-	-	3.64	-2.43	-	-
	Presión de operación	-	-	-	-	-2.90	2.90	-	-
	Eficiencia global del sistema de bombeo	-	-	-	-	3.64	-2.43	-	-
Conversión a riego por goteo	Eficiencia de aplicación	-	-	-	-	1.33	-0.89	-	-
	Presión de operación	-	-	-	-	-1.05	1.05	-	-
	Eficiencia global del sistema de bombeo	-	-	-	-	1.33	-0.89	-	-
Aplicación de riego deficitario	Penalización en el rendimiento de maíz grano	-	-	-	-	-2.11	2.20	-2.12	2.21

^a El escenario de mejora en la eficiencia del uso del fertilizante N sintético fue excluido dado que dicho escenario sólo supuso la reducción en la cantidad de fertilizante N sintético aplicado sin cambios adicionales en los demás insumos utilizados, en las operaciones agrícolas realizadas, y en los rendimientos de maíz grano. ^b T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^c La información sobre las emisiones de GEI asociadas a la producción de semilla criolla no estuvo disponible. ^d El método de labranza de conservación fue labranza en camellones con la misma cantidad de semilla que la labranza convencional. ^e No se reporta la aplicación de herbicidas químicos.

Tabla V.13. Resultados del análisis de sensibilidad de la productividad del agua de riego (*PAR*) de los sistemas de producción de maíz a variables seleccionadas.^a

Práctica agrícola alternativa	Variable ^c	Sistema de producción de maíz ^b			
		GMF		BMF	
		-20%	+20%	-20%	+20%
Adopción de métodos de labranza de conservación	Reducción en el volumen de agua de riego aplicado	-3.00	3.00	-6.25	7.14
Sustitución parcial del fertilizante N sintético con abono verde	Volumen de agua de riego aplicado	25.00	-16.67	25.00	-16.67
Conversión a riego por aspersión	Eficiencia de aplicación	-20.00	20.00	-	-
Conversión a riego por goteo	Eficiencia de aplicación	-20.00	20.00	-	-
Aplicación de riego deficitario	Reducción en el rendimiento de maíz grano	2.22	-2.22	2.22	-2.22

^a El escenario de sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol fue excluido debido a la falta de información acerca de los posibles efectos sobre el volumen de agua de riego de las dosis de aplicación de estiércol aquí consideradas. De igual manera, el escenario de mejora en la eficiencia del uso del fertilizante N sintético fue excluido dado que dicho escenario sólo supuso la reducción en la cantidad de fertilizante N sintético aplicado sin cambios adicionales en los demás insumos utilizados, en las operaciones agrícolas realizadas, y en los rendimientos de maíz grano. ^b T, temporal; G, riego por gravedad; B, riego por bombeo; C, semilla criolla; M, semilla mejorada; F, con aplicación de fertilizantes sintéticos. ^c Sólo se seleccionaron las variables directamente relacionadas con el volumen de agua de riego aplicado o los rendimientos de producción de maíz grano.

En el sistema de producción BMF se consiguieron reducciones notorias tanto en el uso total de energía como en las emisiones totales de GEI por hectárea, pero éstas se originaron principalmente por la disminución en el volumen de agua de riego aplicado como resultado del incremento en la capacidad de retención de agua del suelo con la adopción de la ZT/RT. Por esta misma razón, la *PAR* en los sistemas de producción GMF y BMF aumentó de manera considerable.

En la mayoría de los sistemas de producción, los impactos de la adopción de ZT/RT en la *EI* y la *GEII* fueron más sensibles al aumento esperado en la dosis de aplicación de fertilizante N sintético y en la cantidad de residuos agrícolas retenidos. Nótese que según (Zentner et al., 2004), el aumento en la dosis de fertilizante N sólo sería necesario durante el periodo de transición a labranza de conservación y, en el largo plazo, los requerimientos de fertilizantes sintéticos podrían incluso disminuir, resultando en reducciones adicionales en el uso de energía y las emisiones de GEI.

Por otro lado, los impactos estimados en la *EI* y la *GEII* por la introducción de la ZT/RT serían cancelados por variaciones relativamente pequeñas en los rendimientos de maíz grano, las cuales se antojan muy probables de ocurrir en condiciones reales de producción. Si bien algunos estudios realizados en México sugieren mayores rendimientos de maíz grano bajo labranza de conservación (Govaerts, Sayre, y Deckers, 2006; Tiscareño-López et al., 1999; Verhulst et al., 2011), los efectos parecen depender fuertemente de las características específicas del sitio de cultivo.

La sustitución de 30% del fertilizante N sintético con estiércol redujo sustantivamente el uso de energía por hectárea en todos los sistemas de producción dado que el ahorro de energía asociado a una menor cantidad de fertilizante aplicado supero a la energía necesaria para el transporte y la aplicación del estiércol. Sin embargo, también provocó un incremento en las emisiones totales de GEI por hectárea principalmente a consecuencia de un aumento en las emisiones de N_2O , el cual se debió en gran parte a que el N_2O por la aplicación de estiércol se calculó en base al contenido total de N en vez del PAN. Los ahorros de energía concuerdan con los computados por (McLaughlin et al., 2000) para la producción de maíz utilizando únicamente estiércol (31% - 34% menos energía en comparación con la producción empleando solo fertilizantes sintéticos). El PAN del estiércol y el consumo de diésel para la aplicación del estiércol al suelo fueron las variables con mayor influencia en los impactos del uso de estiércol sobre la *EI* y la *GEII* de los sistemas de producción de maíz. El contenido de nutrientes del estiércol varía según el tipo y la edad del ganado, las características de su alimentación, las condiciones climáticas, y el sistema de manejo del estiércol (Chadwick et al., 2011; Jacobs, 1995a; Sutton et al., 2001).

Asimismo, los requerimientos de diésel para la aplicación del estiércol varían según las condiciones de operación de la maquinaria y las propiedades físicas del estiércol (Batta, Narang, y Chandel, 2015). Dado el número de factores a considerar, es muy probable que el impacto del uso de estiércol en el uso de energía y las emisiones de GEI muestre gran variabilidad. Para cancelar los impactos estimados en la *GEII* y, particularmente, en la *EI* se necesitarían cambios notorios de los rendimientos de maíz grano. No obstante, fluctuaciones importantes en los rendimientos se anticipan poco probables dado que el porcentaje de sustitución por estiércol es relativamente bajo y las cantidades totales de nutrientes suministradas fueron las mismas que en el sistema convencional. En apoyo a lo anterior, estudios de campo de largo plazo reportan que los rendimientos de producción de maíz con estiércol pueden ser similares e incluso mayores a los de la producción con fertilizantes sintéticos (Eghball y Power, 1999; McLaughlin et al., 2000; Nyiraneza, Chantigny, N'Dayegamiye, y Laverdiere, 2009), siempre y cuando el manejo del estiércol sea adecuado.

El cultivo de una leguminosa como abono verde para sustituir parcialmente el fertilizante N sintético aplicado también generó importantes ahorros en el uso total de energía por hectárea puesto que la disminución en la energía embutida en los fertilizantes fue mayor a la energía necesaria para el establecimiento de la leguminosa. Sin embargo, también hubo un aumento moderado en las emisiones totales de GEI por hectárea a consecuencia primordialmente de un incremento en las emisiones de N_2O , el cual respondió en gran parte a que el N_2O de la descomposición de los residuos de la leguminosa se calculó utilizando el contenido total de N de los residuos en lugar de su equivalente como fertilizante N. Otros trabajos publicados reportan reducciones mucho mayores en el uso de energía y las emisiones de GEI (entre 37% - 54% menos energía y hasta 42% menos emisiones de GEI en comparación con la producción a base de fertilizantes sintéticos) en buena medida por diferencias en el tipo de abono verde y su correspondiente aporte de N (Camargo et al., 2013; Ess, 1990).

Obsérvese que el $\%N_{dfa}$, el cual se utilizó como aproximado del equivalente de fertilizante N del abono verde, fue en la mayoría de los casos la variable determinante en los impactos sobre la *EI* y la *GEII* para este escenario alternativo. La producción de biomasa y la acumulación de N de los cultivos usados como abono verde son afectadas por el tipo de planta, las técnicas de cultivo, las condiciones climáticas, las propiedades del suelo, entre otros factores (Cherr, Scholberg, y McSorley, 2006; Fageria, 2007; Liebman, Graef, Nettleton, y Cambardella, 2011). De ahí que el aporte de N del abono verde y, por ende, los potenciales impactos en el uso de energía y las emisiones de GEI muy probablemente variarán de un sitio a otro y de un ciclo de producción a otro. En general, sólo variaciones considerables en los rendimientos de producción de maíz grano podrían nulificar los cambios estimados en la *GEII* y, especialmente, la *EI*. Estudios de campo sobre el uso de frijol terciopelo como abono verde para la siembra de maíz en países tropicales reportan rendimientos similares a los de la producción convencional (Chikowo, Mapfumo, Nyamugafata, y Giller, 2004; Hauser y Nolte, 2002; Kaizzi, Ssali, y Vlek, 2006).

No obstante, el rendimiento de producción podría menguar, sobre todo en condiciones de temporal, a consecuencia de una menor disponibilidad de agua en el suelo debido a que el abono verde consume agua durante su crecimiento (Cherr et al., 2006; Fageria, 2007; Zhang et al., 2016). Pérdidas notorias de rendimiento podrían cancelar la disminución de la *EI* y aumentar aún más la *GEII* en los sistemas de producción TCF y TMF. Asimismo, en condiciones bajo riego, la menor disponibilidad de agua en el suelo podría forzar a incrementar el volumen de agua de riego aplicado a fin de evitar pérdidas de productividad. Esta posibilidad afectaría negativamente la *EI*, la *GEII*, y la *PAR* de los sistemas de producción GMF y BMF, pues implicaría un aumento en el uso de energía para riego y de la demanda de agua para riego. En suma, los impactos potenciales del uso del abono verde como sustituto de los fertilizantes sintéticos en los rendimientos de maíz grano parecen mucho más inciertos en comparación con los de las otras prácticas alternativas examinadas.

La mejora de la NUE fue la única alternativa que redujo tanto el uso total de energía como las emisiones totales de GEI en todos los sistemas de producción de maíz. Este resultado puede explicarse por la disminución en la cantidad de fertilizante N sintético aplicado, cuya fabricación es intensiva en energía y emisiones de GEI, y por la importancia relativa de los fertilizantes sintéticos en el uso total de energía y las emisiones totales de GEI por hectárea sembrada. Trabajos previos también han remarcado la relevancia de la mejora de la NUE como medida efectiva para la conservación de la energía y la mitigación de las emisiones de GEI de los sistemas intensivos de producción agrícola (Alluvione et al., 2011; Gan et al., 2011; Grassini y Cassman, 2012). Si bien en el

presente análisis se asumió un incremento conservador en la NUE, incrementos de mayor magnitud parecen posibles en vista del uso deficiente del fertilizante N sintético en la mayoría de los sistemas de producción examinados. No obstante, aumentos más sustantivos en la NUE muy probablemente demandarían modificaciones profundas en las prácticas de manejo de nutrientes, del suelo, y del cultivo (Cassman, Dobermann, y Walters, 2002; Dobermann, 2007; Pathak y Ladha, 2007), las cuales podrían ser difíciles de implementar en algunos contextos. En consecuencia, el potencial real de mejora de la NUE en el cultivo del maíz podría variar de una localidad a otra y de un sistema de producción a otro.

La conversión a riego presurizado en el sistema de producción GMF aumentó notablemente la *PAR* debido a la reducción en el volumen de agua aplicado bajo riego por aspersión y por goteo. Las reducciones estimadas en el volumen de agua de riego son comparables a las reportadas en estudios previos (entre 27% - 42% menos agua que usando riego por surcos) (Berrada y Halvorson, 2012; Grassini et al., 2011; Ojeda-Bustamante et al., 2006). Sin embargo, la conversión a riego por aspersión aumentó sustantivamente el uso total de energía y las emisiones totales de GEI por hectárea a causa de la electricidad y el diésel adicionales para la operación de los aspersores. En contraste, la conversión a riego por goteo provocó un incremento moderado en el uso total de energía por hectárea aunado a una reducción en las emisiones totales de GEI por hectárea pues evitó la emisión de N_2O por el escurrimiento del N aplicado. Estos resultados se explican en parte por la alta dependencia del sistema de producción GMF de las fuentes de agua superficial, para las cuales se ignoraron los costos energéticos y de emisiones de GEI por extracción y distribución. Según (Jackson et al., 2010), desde el punto de vista del uso de energía y la generación de GEI, sería entonces más conveniente incrementar la *PAR* del sistema de producción GMF mediante la mejora de la eficiencia del riego por surcos.

La presión de operación, la eficiencia global del sistema de bombeo, y la eficiencia de aplicación tuvieron una influencia similar en el impacto en la *EI* y la *GEII* de la conversión a riego presurizado, lo cual subraya la importancia del diseño, operación y mantenimiento apropiados de los sistemas de riego presurizado para reducir en la medida de lo posible sus costos adicionales en términos de energía y emisiones de GEI. La conversión a sistemas de riego más eficientes también podría incrementar la productividad, aunque los aumentos reportados son pequeños y muy por debajo de los necesarios para revertir los impactos estimados en la *EI* y la *GEII*, en particular en el escenario de conversión a riego por aspersión. Por ejemplo, para la producción de maíz con riego por surcos en el estado de Sinaloa, se reporta un aumento de rendimiento por la conversión a riego por aspersión y por goteo de menos de 7% y 4%, respectivamente (Angulo-Santos, 2011; Díaz, Pérez, López, Partidas, y Suárez, 2008). Tales posibles incrementos sólo mejorarían marginalmente la *EI* y la *GEII* estimadas en los escenarios de conversión a riego presurizado. Con respecto a la *PAR*, es poco probable que eventuales variaciones en los rendimientos de producción cancelen el incremento sustancial observado en este indicador.

La aplicación de riego deficitario también trajo consigo una mejora importante en la *PAR* de los sistemas de producción GMF y BMF, pero al mismo tiempo incrementó la *EI* y la *GEII* a consecuencia de la penalización en los rendimientos de producción de maíz. Estos resultados se explican en parte porque la *PAR* es más sensible a cambios en el volumen de agua de riego aplicado, mientras que la *EI* y la *GEII* son más sensibles a cambios en los rendimientos de producción (Rodrigues, Carvalho, Paredes, Silva, y Pereira, 2010). Nótese que los aumentos en la *EI* y la *GEII* fueron menos pronunciados en el sistema de producción BMF ya que, al depender mayoritariamente de agua de pozo profundo, la disminución en el volumen de agua de riego aplicado provocó una reducción

significativa en los requerimientos de energía y la generación de emisiones de GEI. En contraste, el impacto en el sistema de producción GMF fue insignificante dado que la aplicación de riego representa una fracción marginal del uso total de energía y las emisiones totales de GEI por hectárea sembrada.

Trabajos previos coinciden en la mejora notoria de la *PAR* con la utilización de riego deficitario en el cultivo de maíz (desde 5% hasta 38% de aumento en relación con el riego convencional), con la magnitud del impacto variando en función del grado de estrés hídrico inducido y la consecuente penalización en el rendimiento (Grassini et al., 2011; Irmak et al., 2012; Rodrigues et al., 2010). En el presente análisis, los impactos estimados en la *EI*, la *GEII*, y la *PAR* de los sistemas de producción GMF y BMF bajo el escenario de riego deficitario serían nulificados por variaciones más o menos moderadas en los rendimientos de maíz grano. Fluctuaciones en la respuesta de los rendimientos a la aplicación de riego deficitario son probables debido a la influencia de cambios en las condiciones climáticas, los tipos de suelo, los métodos de riego, las técnicas de manejo, entre otros factores (Rudnick et al., 2017) y, por ende, es muy posible que tales cambios moderados en la productividad sucedan en condiciones reales de producción. Entonces, la implementación de estrategias de riego deficitario debería ser cuidadosamente planeada a modo de minimizar en la medida de lo posible los efectos adversos sobre los rendimientos de producción, así como en la *EI*, la *GEII*, y la *PAR*.

V.5. Limitaciones del estudio

Las estimaciones se sustentan enteramente en información secundaria debido a restricciones de costos y tiempo para recabar datos directamente de las unidades de producción o realizar pruebas de campo. La información secundaria recopilada proviene de diferentes sistemas agrícolas en distintos sitios con diversas condiciones agro-climáticas, toda vez que la información disponible específicamente sobre los sistemas de producción de maíz en México es escasa. De ahí que, para refinar las estimaciones, se necesitan datos específicos del maíz en México. En particular, es fundamental obtener información precisa de las variables más sensibles identificadas a través del análisis de sensibilidad.

Las reducciones potenciales se estimaron individualmente para cada una de las prácticas agrícolas seleccionadas, sin embargo, parece factible adoptar simultáneamente dos o más de estas prácticas a modo de conseguir mayores reducciones en el uso de energía, las emisiones de GEI y la demanda de agua para riego. No obstante, la evaluación de los impactos de la introducción de múltiples prácticas alternativas se anticipa difícil conforme a la metodología aquí empleada debido a la incertidumbre sobre las modificaciones apropiadas en las dosis de insumos agrícolas, las operaciones agrícolas realizadas, y los rendimientos de producción.

Para la mayoría de las prácticas agrícolas alternativas examinadas, los posibles impactos en los rendimientos de producción de maíz fueron ignorados puesto que las fuentes de información consultadas reportan efectos variados en los rendimientos de producción debido a la fuerte influencia de factores relacionados con el clima, el suelo, y el manejo del cultivo, así como del periodo de observación. En general, las variaciones en los rendimientos de maíz grano necesarias para cancelar los incrementos (decrementos) en la *EI*, la *GEII*, y la *PAR* son proporcionales a la magnitud de los impactos en el uso de energía, las emisiones de GEI, y la demanda de riego por hectárea sembrada estimados para las distintas prácticas agrícolas alternativas. Si bien una cierta disminución en los rendimientos podría ser tolerable desde el punto de vista de los indicadores

antes mencionados, eventuales pérdidas de productividad serían de enorme preocupación para los productores dado su efecto negativo en la rentabilidad de la unidad de producción. Por ello, los posibles efectos en los rendimientos de producción por la introducción de técnicas agrícolas alternativas deberían ser estudiados con mayor profundidad.

Las prácticas agrícolas alternativas seleccionadas están acompañadas de varios beneficios complementarios que podrían generar reducciones adicionales en los requerimientos de insumos agrícolas y también incrementar la productividad en el largo plazo. No obstante, los impactos potenciales de estos beneficios fueron omitidos en el presente estudio pues son muy específicos del contexto y normalmente se observan varios años después de la adopción de la práctica alternativa, por lo que su número y magnitud son inciertos bajo las condiciones particulares de los sistemas de producción de maíz en México. Se necesita pues información adicional para evaluar adecuadamente sus eventuales impactos en el uso de energía y agua de riego, así como en la generación de emisiones de GEI del cultivo de maíz.

Las posibles barreras a la introducción de las distintas prácticas agrícolas alternativas no fueron consideradas en el presente análisis. Este aspecto merece ser abordado a detalle en trabajos posteriores dado que la implementación de cambios en las técnicas de producción puede ser obstaculizado por múltiples factores de índole técnica, económica, social, política y cultural (Bausch, 2011; Mendoza-Pérez et al., 2016; van Nieuwkoop, 1993).

En la mayoría de los sistemas de producción de maíz, las emisiones de N_2O por la aplicación de N al suelo fueron la fuente dominante de GEI. Sin embargo, las cifras de las emisiones de N_2O padecen las limitaciones de la metodología de estimación aquí empleada (IPCC, 2006), la cual considera un factor de emisión uniforme y, por ende, ignora la influencia de diferencias en cuanto a fuentes de N, niveles de aplicación, prácticas agrícolas, y condiciones agro-climáticas. Estas limitaciones afectan especialmente los estimados de las emisiones de N_2O en los escenarios de la utilización de estiércol y abono verde como sustitutos del fertilizante N sintético. Por lo anterior, las emisiones de GEI aquí calculadas deben ser tomadas con ciertas reservas. Si bien existen metodologías de estimación más robustas (Hoben, Gehl, Millar, Grace, y Robertson, 2011; van Groenigen, Velthof, Oenema, Van Groenigen, y Van Kessel, 2010), éstas demandan información más detallada la cual no estuvo disponible para los sistemas de producción de maíz examinados.

V.6. Conclusiones

Se estimaron las reducciones potenciales en el uso total de energía, las emisiones totales de GEI, y la demanda de agua de riego en los sistemas intensivos convencionales de producción de maíz en México por la adopción de varias prácticas agrícolas alternativas. Los mayores ahorros potenciales en el uso de energía se consiguieron por la sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol o con abono verde, así como con la mejora de la eficiencia del uso del fertilizante N sintético. Esta última alternativa también resultó en las mayores reducciones potenciales en las emisiones totales de GEI en todos los sistemas de producción de maíz. Las reducciones potenciales más sustantivas en el volumen de agua de riego aplicado se obtuvieron mediante la conversión a riego presurizado y, en menor medida, con la introducción de métodos de labranza de conservación.

En general, las prácticas agrícolas alternativas examinadas fueron más efectivas para disminuir el uso total de energía que para mitigar las emisiones totales de GEI. No obstante, las estimaciones de

los GEI generados deben ser tomadas con mucha cautela pues existe gran incertidumbre en las cifras reportadas, principalmente para las emisiones de N₂O por la aplicación de N al suelo.

Dado que en apariencia son más fáciles de implementar, la adopción de mejores prácticas de manejo del fertilizante N sintético y del agua de riego podría ser la opción más apropiada para minimizar el uso de energía, las emisiones de GEI, y la demanda de agua para riego de los sistemas de producción de maíz en el corto plazo. La introducción de las otras prácticas alternativas evaluadas se antoja más complicada debido a sus requerimientos particulares en términos de insumos, equipo y maquinaria, e información especializada.

Las estimaciones deben ser contrastadas con mediciones directas en los campos de cultivo puesto que los impactos calculados son afectados por numerosos factores asociados al tipo de suelo, clima, y prácticas de manejo que seguramente varían de un sitio a otro y de un ciclo de producción a otro. Asimismo, el análisis podría extenderse a otros estados del país a fin de detectar posibles diferencias en los potenciales de reducción del uso de energía, emisiones de GEI, y demanda de agua para riego dentro de cada uno de los sistemas de producción de maíz aquí examinados.

V.7 Referencias

- Adams, M. W. (1980). Energy inputs in dry bean production. En D. Pimentel (Ed.), *Handbook of energy utilization in agriculture* (pp. 123–126). Boca Raton, FL.: CRC Press.
- Ali, M. H., y Talukder, M. S. U. (2008). Increasing water productivity in crop production - A synthesis. *Agricultural Water Management*, 95(11), 1201–1213.
- Alluvione, F., Bertora, C., Zavattaro, L., y Grignani, C. (2010). Nitrous oxide and carbon dioxide emissions following green manure and compost fertilization in corn. *Soil Science Society of America Journal*, 74(2), 384–395.
- Alluvione, F., Moretti, B., Sacco, D., y Grignani, C. (2011). EUE (energy use efficiency) of cropping systems for a sustainable agriculture. *Energy*, 36(7), 4468–4481.
- Angulo-Santos, J. R. (2011). *Labranza de conservación y riego por aspersión en maíz*. Culiacan, Sinaloa, Mexico: Fundación Produce Sinaloa A.C., https://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/Publicaciones-Sinaloa/Paquetes-tecnologicos-2009-2010/MAIZ_Labranza_por_aspersion.pdf [consultado el 05/10/2017].
- Arnés, E., Antonio, J., del Val, E., y Astier, M. (2013). Sustainability and climate variability in low-input peasant maize systems in the central Mexican highlands. *Agric. Ecosyst. and Environ.*, 181, 195–205.
- Barber, A., y Lucock, D. (2006). *Total energy indicators: Benchmarking organic, integrated and conventional sheep and beef farms*. Pukekohe, NZ.: Agriculture Research Group on Sustainability (ARGOS). Research report No. 06/07. The Agribusiness Group, http://www.argos.org.nz/uploads/2/3/7/3/23730248/research_report_0607_sb_energy_indicators.pdf [consultado el 03/12/2017].
- Barut, Z. B., Ertekin, C., y Karaagac, H. A. (2011). Tillage effects on energy use for corn silage in Mediterranean Coastal of Turkey. *Energy*, 36(9), 5466–5475.
- Batta, R., Narang, M. K., y Chandel, R. (2015). Field and economic studies of tractor operated manure spreader with rear vertical rollers - A need based study for organic farming approach in Indian Agriculture. *International Journal of Agricultural Science and Research*, 5(6), 347–356.
- Bausch, J. C. (2011). *Environmental sustainability and conventional agriculture: An assessment of maize monoculture in Sinaloa, Mexico using multicriteria decision analysis and network analysis*. Arizona State University, Tempe, AZ.
- Bellon, M. R., y Hellin, J. (2011). Planting hybrids, keeping landraces: Agricultural modernization and tradition among small-scale maize farmers in Chiapas, Mexico. *World Development*, 39(8), 1434–1443.
- Berrada, A. F., y Halvorson, A. D. (2012). Manure and nitrogen fertilizer effects on corn productivity and soil

- fertility under drip and furrow irrigation. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(12), 1329–1347.
- Bond, L. K., y Beard, R. (1997). *The cost of owning and operating farm machinery*. Logan, UT: All archived publications. Paper 23. Utah State University Cooperative Extension, http://extension.usu.edu/files/publications/publication/AG_503.pdf [consultado el 19/11/2017].
- Boto, F. J., Pastrana, P. S., y Cepeda, M. S. M. (2005). *Consumos energéticos en las operaciones agrícolas en España*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10255_Consumos_energeticos_operaciones_agricolas_Espana_05_b8820458.pdf [consultado el 06/12/2017].
- Camargo, G. G. T., Ryan, M. R., y Richard, T. L. (2013). Energy use and greenhouse gas emissions from crop production using the farm energy analysis tool. *BioScience*, 63(4), 263–273.
- Cassman, K. G., Dobermann, A., y Walters, D. T. (2002). Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, 31(2), 132–140.
- Castellanos, J., Cueto, J., Macías, J., Salinas, J., Tapia, L., Cortés, J., ... Enríquez, S. (2005). *La fertilización en los cultivos de maíz, sorgo y trigo en México*. Celaya, Guanajuato, Mexico: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, <http://www.cofupro.org.mx/cofupro/images/contenidoweb/indice/pdf/Maiz/05-09-fertilizacion.pdf> [consultado el 06/01/2018].
- Chadwick, D., Sommer, S., Thorman, R., Fangueiro, D., Cardenas, L., Amon, B., y Misselbrook, T. (2011). Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. *Animal Feed Science and Technology*, 166–167, 514–531.
- Chakoma, I., Manyawu, G., Gwiriri, L., Moyo, S., y Dube, S. (2015). *Velvetbean (Mucuna pruriens) production in Southern Africa*. Harare, Zimbabwe: Crop Production Manual. International Livestock Research Institute (ILRI) - Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), <http://repo.mel.cgiar.org/handle/20.500.11766/4942> [consultado el 02/02/2018].
- Cherr, C. M., Scholberg, J. M., y McSorley, R. (2006). Green manure approaches to crop production: A synthesis. *Agronomy Journal*, 98, 302–319.
- Chikowo, R., Mapfumo, P., Nyamugafata, P., y Giller, K. E. (2004). Maize productivity and mineral N dynamics following different soil fertility management practices on a depleted sandy soil in Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 102(2), 119–131.
- Christensen, L. A. (2002). *Soil, nutrient, and water management systems used in U.S. corn production*. Agriculture Information Bulletin No. 774. US Department of Agriculture.
- Colaizzi, P. D., Evett, S. R., y Howell, T. A. (2011). Corn production with spray, LEPA, and SDI. En *Proc. of the 23rd Annual Central Plains Irrigation Conference* (pp. 52–67). Burlington, CO. Feb. 22-23, https://dspace.library.colostate.edu/bitstream/handle/10217/47726/101_CPIA_2011All.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=54 [consultado el 29/01/2018].
- CONAGUA. (2016). *Estadísticas del agua en México 2016*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua, http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf [consultado el 15/10/2017].
- Cruse, M. J., Liebman, M., Raman, D. R., y Wiedenhoef, M. H. (2010). Fossil energy use in conventional and low-external-input cropping systems. *Agronomy Journal*, 102(3), 934–941.
- Daccache, A., Ciurana, J. S., Rodriguez Diaz, J. A., y Knox, J. W. (2014). Water and energy footprint of irrigated agriculture in the Mediterranean region. *Environmental Research Letters*, 9(12), 1–12.
- Dalgaard, T., Halber, N., y Porter, J. R. (2001). A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compared organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 87(1), 51–65.
- Díaz, T., Pérez, N. W., López, A., Partidas, L., y Suárez, Y. E. (2008). Manejo sostenible del agua en zonas semiáridas: evaluación de dos técnicas de riego y fertilización nitrogenada en Sinaloa, México. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(1), 53–56.
- Dinkins, C. P., Jones, C., y McVay, K. (2008). *Nutrient Management in No-till and Minimum Till Systems*. MT, USA: EB0182. Montana State University Extension, <https://www.agweb.com/assets/import/files/eb0182.pdf> [consultado el 18/12/2017].
- Diotto, A. V., y Irmak, S. (2016). Embodied energy and energy return on investment analyses in maize production for grain and ethanol under center pivot, subsurface drip, and surface (furrow) irrigation with disk tillage and no-till practices. *Transactions of the ASABE*, 59(3), 873–884.
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency-measurement and management. En *Proc. of the International*

- Fertilizer Industry Association (IFA) Workshop on Fertilizer Best Management Practices (pp. 1–28). March 7–9. Brussels, Belgium.
- Eghball, B., y Power, J. F. (1999). Phosphorus- and nitrogen-based manure and compost applications: Corn production and soil phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4), 895–901.
- Eilittä, M., Sollenberger, L. E., Littell, R. C., y Harrington, L. W. (2003a). On-farm experiments with maize-mucuna systems in the Los Tuxtlas region of Veracruz, Mexico. I. Mucuna biomass and maize grain yield. *Experimental Agriculture*, 39(1), 5–17.
- Eilittä, M., Sollenberger, L. E., Littell, R. C., y Harrington, L. W. (2003b). On-farm experiments with maize-mucuna systems in the Los Tuxtlas region of Veracruz, Southern Mexico. II. Mucuna variety evaluation and subsequent maize grain yield. *Experimental Agriculture*, 39(1), 19–27.
- Ess, D. R. (1990). *Energetics of low-input corn production*. Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg,
https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/42915/LD5655.V855_1990.E877.pdf?sequence=1 [consultado el 20/01/2018].
- Fageria, N. K. (2007). Green Manuring in Crop Production. *Journal of Plant Nutrition*, 30(5), 691–719.
- FAO. (2010). *CROPWAT 8.0*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations,
http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html [consultado el 05/02/2017].
- FIRA. (2017). *Sistema de Costos Agrícolas*. México: Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura,
<https://www.fira.gob.mx/Nd/Agrocostos.jsp> [consultado el 03/05/2017].
- Flores-Gallardo, H., Sifuentes-Ibarra, E., Flores-Magdaleno, H., Ojeda-Bustamante, W., y Ramos-García, C. R. (2014). Water conservation techniques in surface irrigation at plantation level. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2), 241–252.
- Frye, W. W. (1984). Necesidades energéticas con laboreo nulo. En R. E. Phillips y S. H. Phillips (Eds.), *Agricultura sin laboreo. Principios y aplicaciones*. (pp. 132–156). Barcelona: Ediciones Bellaterra.
- Gan, Y., Liang, C., Hamel, C., Cutforth, H., y Wang, H. (2011). Strategies for reducing the carbon footprint of field crops for semiarid areas. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(4), 643–656.
- Giampietro, M. (2001). Energy use in agriculture. *Encyclopedia of Life Sciences*, 1–16.
- Gomiero, T., Paoletti, M. G., y Pimentel, D. (2008). Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27(4), 239–254.
- Gordon, H. (n.d.). Approximate fuel required for field operations. Natural Resource Conservation Service. US Department of Agriculture,
https://www.nrcs.usda.gov/wps/PA_NRCSCConsumption/download?cid=STELPRDB1257053&ext=xls [consultado el 06/06/2018].
- Govaerts, B., Sayre, K. D., y Deckers, J. (2006). A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 163–174.
- Grassini, P., y Cassman, K. G. (2012). High-yield maize with large net energy yield and small global warming intensity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(4), 1074–9.
- Grassini, P., Yang, H., Irmak, S., Thorburn, J., Burr, C., y Cassman, K. G. (2011). High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II. Irrigation management and crop water productivity. *Field Crops Research*, 120(1), 133–141.
- Griffith, D. R., y Parsons, S. D. (1983). *Energy requirements for various tillage-planting systems*. West Lafayette, IN: Purdue University. Cooperative Extension Service NCR-202-W,
<https://www.extension.purdue.edu/extmedia/NCR/NCR-202-W.html> [consultado el 18/03/2018].
- Hauser, S., y Nolte, C. (2002). Biomass production and N fixation of fice Mucuna pruriens varieties and their effect on maize yields in the forest zone of Cameroon. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(1), 101–109.
- Hennecke, A. M., Mueller-Lindenlauf, M., García, C. A., Fuentes, A., Riegelhaupt, E., y Hellweg, S. (2016). Optimizing the water, carbon, and land-use footprint of bioenergy production in Mexico - Six case studies and the nationwide implications. *Biofuels Bioproducts and Biorefining*, 10(3), 222–239.
- Hillier, J., Hawes, C., Squire, G., Hilton, A., Wale, S., y Smith, P. (2009). The carbon footprints of food crop production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 7(2), 107–108.
- Hoben, J. P., Gehl, R. J., Millar, N., Grace, P. R., y Robertson, G. P. (2011). Nonlinear nitrous oxide (N₂O)

- response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest. *Global Change Biology*, 17(2), 1140–1152.
- Hoepfner, J. W., Entz, M. H., McConkey, B. G., Zentner, R. P., y Nagy, C. N. (2005). Energy use and efficiency in two Canadian organic and conventional crop production systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 21(1), 60–67.
- Houngnandan, P., Sanginga, N., Woomer, P., Vanlauwe, B., y van Cleemput, O. (2000). Response of *Mucuna pruriens* to symbiotic nitrogen fixation by rhizobia following inoculation in farmers' fields in the derived savanna of Benin. *Biology and Fertility of Soils*, 30(5–6), 558–565.
- INECC. (2012). *Quinta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/685.pdf> [consultado el 25/10/2017].
- INIFAP. (2017). *Red de estaciones agrometeorológicas*. Ags., Mexico: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, <http://clima.inifap.gob.mx/Inmysr/Estaciones> [consultado el 10/05/2016].
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Japan: National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- IPCC. (2007). *IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group I: The physical science basis*. Cambridge, UK - New York, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Irmak, S., Burgert, M. J., Yang, H. S., Cassman, K. G., Walters, D. T., Rathje, W. R., ... Teichmeier, G. J. (2012). Large-scale on-farm implementation of soil moisture-based irrigation management strategies for increasing maize water productivity. *Transactions of the ASABE*, 55(3), 881–894.
- Jackson, T. M., Khan, S., y Hafeez, M. (2010). A comparative analysis of water application and energy consumption at the irrigated field level. *Agricultural Water Management*, 97(10), 1477–1485.
- Jacobs, L. W. (1995a). *Manure Management - Utilization of animal manure for crop production. Part I. Management of manure nutrients and water quality*. East Lansing, Mich.: Michigan State University Extension Bulletin MM-1. Michigan State University, http://anrcom.msu.edu/uploads/files/20/Bull_MM-1.pdf [consultado el 06/05/2018].
- Jacobs, L. W. (1995b). *Manure Management - Utilization of animal manure for crop production. Part II. Manure application to cropland*. East Lansing, Mich.: Michigan State University Extension Bulletin MM-1. Michigan State University, http://anrcom.msu.edu/uploads/files/20/Bull_MM-2.pdf [consultado el 06/05/2018].
- Joern, B. C., y Brichford, S. L. (1993). *Calculating manure and manure nutrient application rates*. West Lafayette, IN: Publication AY-277. Purdue University Cooperative Extension Service, <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/AY/AY-277.html> [consultado el 06/05/2018].
- Juárez-Hernández, S., y Sheinbaum, C. (2018). Irrigation energy use and related greenhouse gas emissions of maize production in Mexico. *International Journal of Water Resources Development*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1482739>.
- Juárez-Hernández, S., Usón, S., y Sheinbaum, C. (n.d.). Assessing maize production systems in Mexico from an energy, exergy, and greenhouse-gas emissions perspective. *Manuscript Submitted for Publication*.
- Kaizzi, C. K., Ssali, H., y Vlek, P. L. G. (2004). The potential of Velvet bean (*Mucuna pruriens*) and N fertilizers in maize production on contrasting soils and agro-ecological zones of East Uganda. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68(1), 59–72.
- Kaizzi, C. K., Ssali, H., y Vlek, P. L. G. (2006). Differential use and benefits of velvet bean (*Mucuna pruriens* var. utilis) and N fertilizers in maize production in contrasting agro-ecological zones of E. Uganda. *Agricultural Systems*, 88(1), 44–60.
- Khakbazan, M., Mohr, R. M., Derksen, D. A., Monreal, M. A., Grant, C. A., Zentner, R. P., ... Nagy, C. N. (2009). Effects of alternative management practices on the economics, energy and GHG emissions of a wheat-pea cropping system in the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research*, 104(1), 30–38.
- Kranz, W. L., Eisenhauser, D. E., y Retka, M. T. (1992). Water and energy conservation using irrigation scheduling with center pivot irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 22(4), 325–334.
- Lal, R. (2004). Carbon emission from farm operations. *Environment International*, 30(7), 981–990.

- Liebman, M., Graef, R. L., Nettleton, D., y Cambardella, C. A. (2011). Use of legume green manures as nitrogen sources for corn production. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 27(3), 180–191.
- Lora, D. C., Ramos, R. G., y Fernández, M. S. (2015). Consumo energético de la maquinaria agrícola con el empleo de técnicas de agricultura de precisión. *Revista Ingeniería Agrícola*, 5(2), 23–28.
- Ma, B. L., Liang, B. C., Biswas, D. K., Morrison, M. J., y McLaughlin, N. B. (2012). The carbon footprint of maize production as affected by nitrogen fertilizer and maize-legume rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94(1), 15–31.
- Masera, O. R., Almeida, R. S., Cervantes, J., Dutt, G. S., García, L., Garza, J. F., ... Sheinbaum, C. (1987). *El patrón de consumo energético y su diferenciación social. Estrudio de caso en una comunidad rural de México*. México D.F.: Cuadernos sobre prospectiva energética no. 108. El Colegio de México.
- Mask, P. L., Everest, J., Mitchell, C. C., y Reeves, D. W. (1994). *Conservation tillage for corn in Alabama*. AL, USA.: ANR-811. Alabama Cooperative Extension System, <http://www.aces.edu/pubs/docs/A/ANR-0811/ANR-0811.pdf> [consultado el 26/08/2017].
- McLaughlin, N. B., Hiba, A., Wall, G. J., y King, D. J. (2000). Comparison of energy inputs for inorganic fertilizer and manure based corn production. *Canadian Agricultural Engineering*, 42(1), 9–17.
- McMichael, A. J., Powles, J. W., Butler, C. D., y Uauy, R. (2006). Food, livestock production, energy, climate change, and health. *The Lancet*, 370(9594), 1253–1263.
- Medina-García, G., Rumayor-Rodríguez, A., Cabañas-Cruz, B., Luna-Flores, M., Ruiz-Corral, J. A., Gallegos-Vázquez, C., ... Bravo-Lozano, A. G. (2003). *Potencial productivo de especies agrícolas en el estado de Zacatecas*. Calera de V.R., Zacatecas: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/handle/123456789/1953> [consultado el 10/12/2017].
- Mendoza-Pérez, C., Sifuentes-Ibarra, E., Ojeda-Bustamante, W., y Macías-Cervantes, J. (2016). Response of surface-irrigated corn to regulated deficit irrigation. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 8(1), 29–40.
- Miller, J. J., Sweetland, N. J., y Chang, C. (2002). Hydrological properties of a clay loam soil after long-term cattle manure application. *Journal of Environmental Quality*, 31(3), 989–996.
- Montañez, R., y Warman, A. (1982). *El cultivo de maíz en México. Diversidad, limitaciones y alternativas. Seis casos de estudio*. México, D.F.: Centro de Ecodesarrollo.
- Nieuwkoop, M., López Baez, W., Zamarripa Moran, A., De la Piedra Constantino, R., Cruz Chavez, F. J., Camas Gómez, R., y López Martínez, J. (1994). *La adopción de las tecnologías de labranza de conservación en La Fraylesca, Chiapas*. Mexico: CIMMYT, <https://repository.cimmyt.org/xmlui/handle/10883/529> [consultado el 12/11/2017].
- Nyiraneza, J., Chantigny, M. H., N'Dayegamiye, A., y Laverdiere, M. R. (2009). Dairy cattle manure improves soil productivity in low residue rotation systems. *Agronomy Journal*, 101(1), 207–214.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., y Unland-Weiss, H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte del Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), 13–25.
- Ojiem, J. O., Vanlauwe, B., de Ridder, N., y Giller, K. E. (2007). Niche-based assessment of contributions of legumes to the nitrogen economy of Western Kenya smallholder farms. *Plant and Soil*, 292(1–2), 119–135.
- Okito, A., Rodrigues, J., Urquiaga, S., y Boddey, R. M. (2004). Nitrogen fixation by groundnut and velvet bean and residual benefit to a subsequent maize crop. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39(12), 1183–1190.
- Ortiz-Ceballos, A. I., Aguirre-Rivera, J. R., Salgado-García, S., y Ortiz-Ceballos, G. (2015). Maize-Velvet Bean Rotation in Summer and Winter Milpas: A Greener Technology. *Agronomy Journal*, 107(1), 330–336.
- Parihar, C. M., Jat, S. L., Singh, A. K., Kumar, B., Rathore, N. S., Jat, M. L., ... Kuri, B. R. (2018). Energy auditing of long-term conservation agriculture based irrigated intensive maize systems in semi-arid tropics of India. *Energy*, 142, 289–302.
- Partelli, F. L., Vieira, H. D., Ferreira, E. P. B., Viana, A. P., Espindola, J. A. A., Urquiaga, S., y Boddey, R. M. (2011). Biologic dinitrogen fixation and nutrient cycling in cover crops and their effect on organic Conilon coffee. *Ciencias Agrarias*, 32(3), 995–1006.
- Pathak, H., y Ladha, J. K. (2007). Improving nitrogen use efficiency: Strategies, tools, management and policy options. En Y. P. Abrol, N. Raghuram, y M. S. Sachdev (Eds.), *Agricultural Nitrogen Use and its Environmental Implications* (pp. 279–302). New Delhi: I.K. International Publishing House Pvt. Ltd.
- Phocaides, A. (2000). *Technical Handbook on Pressurized Irrigation Techniques*. Rome: Food and Agriculture

Organization of the United Nations.

- Pimentel, D. (2004). Energy flows in industrial agriculture. *Encyclopedia of Energy*, 365–371.
- Pimentel, D., Hepperly, P., Hanson, J., Douds, D., y Seidel, R. (2005). Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems. *BioScience*, 55(7), 573–582.
- Pretty, J. N., Ball, A. S., Xiaoyun, L., y Ravindranath, H. (2002). The role of sustainable agriculture and renewable-resource management in reducing greenhouse-gas emissions and increasing sinks in China and India. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 360(1797), 1741–1761.
- Rehm, G., Randall, G., y Evans, S. (1993). Fertilizer management for corn planted in ridge-till or no-till systems. MN, USA.: AG-FO-6074-B Minnesota Extension Service. University of Minnesota, <https://www.extension.umn.edu/agriculture/nutrient-management/fertilizer-management/fertilizer-management-for-corn/docs/AG-FO-6074-B-1.pdf> [consultado el 19/03/2018].
- Rodrigues, G. C., Carvalho, S., Paredes, P., Silva, F. G., y Pereira, L. S. (2010). Relating energy performance and water productivity of sprinkler irrigated maize, wheat and sunflower under limited water availability. *Biosystems Engineering*, 106(2), 195–204.
- Rothausen, S. G. S. a., y Conway, D. (2011). Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector. *Nature Climate Change*, 1(4), 210–219.
- Rudnick, D., Irmak, S., Ray, C., Schneekloth, J., Schipanski, M., Kisekka, I., ... Porter, D. (2017). Deficit irrigation management of corn in the High Plains: A review. En *Proc. of the 29 th Annual Central Plains Irrigation Conference* (pp. 66–84). Burlington, Colorado. Feb. 21-22.
- Sarauskis, E., Buragiene, S., Masilionyte, L., Romanecas, K., Avizienyte, D., y Sakalauskas, A. (2014). Energy balance, costs and CO₂ analysis of tillage technologies in maize cultivation. *Energy*, 69, 227–235.
- SENER. (2017). *Balance Nacional de Energía 2016*. Ciudad de México : Secretaría de Energía, http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/41975/Balance_2013.pdf [consultado el 01/03/2018].
- SIAP. (2008). *Seguimiento de costos de producción pecuaria y agrícola por sistema-production*. México D.F.: Project SISPRO-SECOPPA. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SAGARPA, <http://www.campomexicano.gob.mx/viocs/acceso.php#> [consultado el 16/05/2016].
- SIAP. (2017a). *Balanza disponibilidad-consumo de maíz grano*. Ciudad de México : Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, <http://www.numerosdelcampo.sagarpa.gob.mx/publicnew/productosAgricolas/cargarPagina/4> [consultado el 29/06/2017].
- SIAP. (2017b). *Sistema de información agroalimentaria de consulta (SIACON) 1980-2014 [Agri-food consultation information system 1980-2014]*. Ciudad de México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430> [consultado el 16/08/2016].
- Sifuentes, E., Macías, J., Quintana, J. G., Corral, R. A., González, V. M., y Ojeda, W. (2011). *Tecnologías de riego bajo condiciones de escasez de agua en maíz*. Culiacan, Sinaloa, Mexico: Fundación Produce Sinaloa A.C., <http://www.fps.org.mx/portal/index.php/paquetes-tecnologicos/123-maiz/1885-tecnologias-de-riego-bajo-condiciones-de-escasez-de-agua-en-maiz> [consultado el 10/09/2017].
- Silva, A. G. B., Guerra, J. G. M., Junior, M. G., Costa, J. R., Espíndola, J. A. A., y Araújo, E. S. (2011). Desempenho agrônômico de mucuna-verde em diferentes arranjos espaciais [Agronomic performance of velvet bean at different spatial arrangement]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(6), 603–608.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., ... Smith, J. (2008). Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363(1492), 789–813.
- Sutton, A. L., Jones, D. D., Joern, B. C., y Huber, D. M. (2001). *Animal manure as a plant nutrient resource*. West Lafayette, IN: ID-101. Cooperative Extension Service. Purdue University, <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/ID/ID-101.html> [consultado el 10/02/2018].
- Tiscareño-López, M., Báez-González, A. D., Velázquez-Valle, M., Potter, K. N., Stone, J. J., Tapia-Vargas, M., y Claverán-Alonso, R. (1999). Agricultural research for watershed restoration in central Mexico. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54(4), 686–692.
- Toledo, V. M., Carabias, J., Toledo, C., y González, C. (1989). *Producción rural de México: Alternativas ecológicas*. México, D.F.: Fundación Universo XXI.
- Tuomisto, H. L., Hodge, I. D., Riordan, P., y Macdonald, D. W. (2012). Comparing global warming potential,

- energy use and land use of organic, conventional and integrated winter wheat production. *Annals of Applied Biology*, 161(2), 116–126.
- van Groenigen, J. W., Velthof, G. L., Oenema, O., Van Groenigen, K. J., y Van Kessel, C. (2010). Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: A case study for arable crops. *European Journal of Soil Science*, 61(6), 903–913.
- van Nieuwkoop, M. (1993). Labranza de conservacion en sistemas de producción de maíz en México: Un marco general de diagnóstico. *Agrociencia*, 4(1), 33–50.
- Velázquez, J. de J., Salinas, J. R., Potter, K. N., Gallardo, M., Caballero, F., y Díaz, P. (2002). Cantidad, cobertura y descomposición de residuos de maíz sobre el suelo. *Terra Latinoamericana*, 20(2), 171–182.
- Verhulst, N., Nelissen, V., Jespers, N., Haven, H., Sayre, K. D., Raes, D., ... Govaerts, B. (2011). Soil water content, maize yield and its stability as affected by tillage and crop residue management in rainfed semi-arid highlands. *Plant and Soil*, 344(1–2), 73–85.
- West, T. O., y Marland, G. (2002). A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 91(1–3), 217–232.
- Woods, J., Williams, A., Hughes, J. K., Black, M., y Murphy, R. (2010). Energy and the food system. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 365(1554), 2991–3006.
- Zentner, R. P., Lafond, G. P., Derksen, D. A., Nagy, C. N., Wall, D. D., y May, W. E. (2004). Effects of tillage method and crop rotation on non-renewable energy use efficiency for a thin Black Chernozem in the Canadian Prairies. *Soil and Tillage Research*, 77(2), 125–136.
- Zhang, D., Yao, P., Na, Z., Cao, W., Zhang, S., Li, Y., y Gao, Y. (2016). Soil water balance and water use efficiency of dryland wheat in different precipitation years in response to green manure approach. *Scientific Reports*, 6(26856), 1–12.

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

CAPÍTULO VI

Estimación del consumo de agua, uso de energía, y emisiones de gases de efecto invernadero de origen energético de la producción industrial de harina de maíz nixtamalizado

Resumen

El maíz es uno de los cultivos básicos más importantes en México, utilizándose predominantemente para el consumo humano directo. El principal alimento derivado del maíz son las tortillas. Casi la mitad de la producción nacional de tortillas se elabora a partir de harina de maíz nixtamalizado (HMN). El objetivo del presente trabajo es estimar el consumo de agua potable, el uso de energía, y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de origen energético de la producción industrial de HMN. A partir de información disponible en fuentes bibliográficas, se reconstruyó un proceso simplificado genérico de producción de HMN y se definieron los parámetros de operación de las principales operaciones unitarias. Las operaciones unitarias consideradas fueron: pre-cocimiento alcalino, lavado mecanizado, pre-acondicionamiento, primera y segunda molienda, secado, enfriamiento, cernido, y clasificación. Por tonelada métrica de HMN elaborada, el consumo total de agua potable se estimó en casi 2.43 m³, el uso total de energía en 3.00 GJ, y las emisiones totales de GEI en 199.60 kg CO₂e. El lavado de los granos de maíz pre-cocido fue la operación unitaria más demandante de agua, en tanto que el secado fue la más intensiva en energía y emisiones de GEI. Se discuten brevemente algunas posibles estrategias para disminuir el consumo de agua, el uso de energía, y las emisiones de GEI. Los valores estimados son preliminares y deben ser validados preferentemente con datos de plantas de HMN en operación. Los resultados son útiles como base para realizar análisis más detallados del consumo de recursos naturales y los impactos ambientales de la producción industrial de HMN.

Nomenclatura

Abreviatura/símbolo	Descripción	Unidades
b.h.	Base húmeda	-
b.s.	Base seca	-
c_p	Capacidad térmica específica a presión constante	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
D	Tamaño de partícula	mm
E_g	Energía para molienda	kWh kg^{-1}
E_k	Energía cinética	kJ
E_p	Energía potencial	kJ
GEI	Gases de efecto invernadero	-
H	Entalpía	kJ
h	Entalpía específica	kJ kg^{-1}
h_L	Calor latente específico de vaporización del agua	kJ kg^{-1} de agua
HMN	Harina de maíz nixtamalizado	-

HR	Contenido de humedad del aire	kg de agua kg ⁻¹ de aire seco
<i>m</i>	Masa	Kg
MC	Contenido de humedad	%
<i>P</i>	Presión	kPa(abs)
<i>Q</i>	Calor	kJ
<i>r</i>	Cociente de las capacidades térmicas específicas	-
<i>T</i>	Temperatura	K ó °C
<i>Th</i>	Grosor del grano de maíz	mm
<i>V</i>	Volumen	m ³
<i>W</i>	Trabajo	kJ
<i>Wi</i>	Índice de trabajo de Bond	kWh kg ⁻¹
<i>X</i>	Fracción en masa	-
Subíndices		
<i>O</i>	Condición de referencia	
<i>a</i>	Aire	
<i>bc</i>	Ventilador de aire del enfriador	
<i>bd</i>	Ventilador de aire del secador	
<i>c</i>	Clasificador	
<i>ca</i>	Aire para enfriamiento	
<i>final</i>	Final	
<i>fm</i>	Primera molienda	
<i>ha</i>	Aire caliente para secado	
<i>hw</i>	Agua caliente para lavado	
<i>i</i>	Componente	
<i>in</i>	Entrada	
<i>initial</i>	Inicial	
<i>out</i>	Salida	
<i>rw</i>	Lavador mecánico	
<i>s</i>	Cernidor	
<i>sc</i>	Tortillo transportador	
<i>sm</i>	Segunda molienda	
<i>wp</i>	Bomba de agua	

VI.1 Introducción

Las industrias de procesamiento de alimentos son un componente esencial de los sistemas alimentarios modernos. El procesamiento de los alimentos involucra una serie de transformaciones físicas, químicas, enzimáticas o microbiológicas en los alimentos primarios para obtener productos

procesados que se conservan por más tiempo, son más diversos, tienen mayor valor nutricional, así como valor agregado (Fellows, 2017; Park et al., 2014). Para ello, las industrias de procesamiento de los alimentos emplean múltiples recursos, incluidos agua y energía. El agua se utiliza ampliamente en las industrias de alimentos y bebidas, tanto como ingrediente como insumo auxiliar en los procesos de transferencia de masa y calor, como son separación, lavado, calentamiento, y enfriamiento (Kim and Smith, 2008; Lee y Okos, 2011). Además de demandar cantidades ingentes de agua, la industria del procesamiento de alimentos también impacta en la calidad del agua dado que sus efluentes en general tienen contenidos altos de materia orgánica por lo que representan una carga ambiental potencialmente dañina (Elkin y Stevens, 2008; Lee y Okos, 2011).

La industria del procesamiento de los alimentos también demanda una cantidad importante de energía. Las energías térmica y eléctrica son las principales formas de energía utilizadas en la industria alimentaria para llevar a cabo operaciones de calentamiento, enfriamiento, refrigeración, transporte, entre muchas otras (Marcotte y Grabowski, 2008). Así, la industria de alimentos y bebidas puede representar una porción considerable del uso total de energía en el sector industrial (Evans, 2008; Klemes y Perry, 2008; Rodríguez-Gonzalez et al., 2015). Además, dado que los combustibles fósiles son la fuente principal de energía para la obtención de calor y electricidad, el uso de energía en la industria del procesamiento de alimentos también genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y por tanto contribuye al calentamiento global y cambio climático (Bühler et al., 2018; Garnett, 2011; Moejes y van Boxtel, 2017).

Debido a la creciente escasez de recursos naturales, demanda de alimentos, y degradación ambiental, existe una necesidad cada vez mayor de optimizar la eficiencia en el uso de recursos y el desempeño ambiental de los sistemas alimentarios. En este sentido, un manejo adecuado del agua y la energía en las instalaciones de procesamiento de alimentos puede ayudar a reducir los costos de operación, aumentar la productividad, y mejorar la sustentabilidad del sector de procesamiento de los alimentos (Savulescu y Kim, 2008; Waheed et al., 2008; Zisopoulos et al., 2017). El estudio de los patrones de uso del agua y la energía en las operaciones de procesamiento de alimentos es indispensable para identificar posibles acciones para optimizar la eficiencia en el uso de recursos naturales y atenuar los impactos ambientales de la industria alimentaria. Asimismo, dado que el nivel de uso del agua y la energía dependen en gran medida del tipo de alimento y método de producción (Zisopoulos et al., 2017), se requieren estudios específicos para cada alimento y tecnología de producción.

El maíz (*Zea mays* L.) ha sido y sigue siendo uno de los cultivos básicos más importantes en México. Durante el periodo 2005 – 2014, la superficie sembrada anual promedio con maíz grano fue aproximadamente 7.75 millones de hectáreas y la producción total alcanzó cerca de 21.82 millones de toneladas (SIAP, 2017a). La mayoría de la superficie sembrada y la producción correspondió a maíz grano blanco (SIAP, 2017a), el cual se utiliza predominantemente para consumo humano directo (SIAP, 2017b). Normalmente, el maíz para consumo humano se somete a un tratamiento térmico alcalino, también llamado nixtamalización, consistente en cocer y remojar los granos enteros de maíz en una suspensión de cal, escurrirlos y lavarlos repetidamente para remover el exceso de cal y la capa exterior del grano (i.e. pericarpio). El maíz cocido y lavado se conoce como nixtamal y el licor de cocción, que contiene sólidos de maíz perdidos durante la cocción así como la mayoría de la cal añadida, se denomina nejayote (McDonough et al., 2001; Rooney y Serna-Saldivar, 2003a; Serna-Saldivar et al., 1990).

El cocimiento alcalino provoca una serie de transformaciones físicas y químicas en los granos de maíz que facilitan su posterior procesamiento y mejoran la palatabilidad y valor nutricional de los alimentos derivados del maíz (Gwirtz y Garcia-Casal, 2014; McDonough et al., 2001; Sahai et al., 2000). El alimento derivado del maíz más importante en México son las tortillas, alimento en forma circular, plana y delgada elaborado con masa de maíz nixtamalizado. Anualmente, alrededor de 12 millones de toneladas de maíz grano se utilizan para la elaboración de tortillas (Rooney y Serna-Saldivar, 2003a). El procesamiento primario del maíz para la producción de tortillas lo realizan fundamentalmente dos industrias, a saber, la industria tradicional de la masa de nixtamal y la industria de la harina de maíz nixtamalizado (HMN).

La industria tradicional de la masa de nixtamal la integran los molinos de nixtamal, donde los granos enteros de maíz se someten a la técnica tradicional de cocimiento alcalino y después se introducen en molinos de piedras obteniendo una masa húmeda con la cual se elaboran las tortillas (McDonough et al., 2001; Serna-Saldivar et al., 2001, 1990). Esta industria está altamente fragmentada, contabilizándose alrededor de 10,000 molinos de nixtamal distribuidos en todo el país (Domínguez-Espinosa y Pacho-Carrillo, 2003), la mayoría pequeños negocios de propiedad familiar (Torres, 1994). Debido en parte a estas particularidades, la producción tradicional de masa de nixtamal se distingue por la generación de efluentes altamente contaminantes (Domínguez-Espinosa y Pacho-Carrillo, 2003), una dependencia de los combustibles fósiles y pobre eficiencia energética (Ambriz y Paredes, 2009), así como la generación de cantidades considerables de emisiones de GEI (Vidal-Amaro, 2012). Actualmente, cerca de 55% – 60% del total de tortillas se elaboran con masa tradicional de nixtamal y el restante 40% – 45% con HMN (González-Arguinzones, 2014; Rooney y Serna-Saldivar, 2003a; Serna-Saldivar et al., 2001).

Para producir HMN, los granos enteros de maíz se someten a un cocimiento alcalino acelerado, seguido de lavado, molienda fina, secado, cernido, y mezclado para obtener la combinación deseada de los diferentes tamaños de partículas (Rooney y Serna-Saldivar, 2003a; Serna-Saldivar et al., 2001, 1990). La masa húmeda para la elaboración de tortillas se prepara simplemente agregando agua a la HMN. La industria de la HMN se concentra en un puñado de grandes empresas que acumulan una capacidad de procesamiento cercana a 3.6 millones de toneladas por año (GRUMA, 2015; MINSA, 2015). En el periodo 2008 – 2013, la producción nacional de HMN osciló entre 2.0 – 2.5 millones de toneladas, exhibiendo una tasa promedio de crecimiento anual de casi 1% (FIRA, 2014). La HMN tiene algunas ventajas sobre la masa de nixtamal, como el que se conserva por más tiempo, proporciona mayor conveniencia y flexibilidad, y su producción genera menores cantidades de desechos (Mehta, 2001; Rooney y Serna-Saldivar, 2003a; Serna-Saldivar et al., 1990). Sin embargo, existe poca información pública sobre los patrones de uso de insumos claves, como el agua y la energía, e impactos ambientales asociados de la fabricación industrial de HMN. Esta información es vital para evaluar la sustentabilidad de las industrias de procesamiento de alimentos, así como también para identificar posibles alternativas de mejora. Considerando lo anterior y la importancia creciente de la industria de la HMN en México, el objetivo del presente trabajo es estimar el consumo de agua, el uso de energía y las emisiones de GEI de origen energético en la producción industrial de HMN.

VI.2 Metodología y fuentes de información

Las estimaciones se realizaron a partir de información recabada de fuentes bibliográficas dado que no fue posible obtener datos reales de alguna planta de producción de HMN. Entonces, la

información sobre las principales operaciones unitarias, condiciones de operación, y equipo utilizado se recabó de la literatura relevante (McDonough et al., 2001; Rooney y Serna-Saldivar, 2003b; Serna-Saldivar et al., 2001, 1990; Serna-Saldivar y Rooney, 2015). Además, se consultaron varias patentes relacionadas con la producción de HMN (Rubio et al., 2011, 2006, 2003b, 2003a, 2002, 2001, Rubio, 1985, 1982; Sunderland, 1996). Con la información recopilada, se elaboró un diagrama simplificado del proceso genérico de producción de HMN, detallando las principales operaciones unitarias y las condiciones de operación respectivas.

VI.2.1 Descripción del proceso

Los granos de maíz enteros y limpios, la cal, y el agua se introducen en un pre-cocedor continuo, generalmente un contenedor cilíndrico equipado con un tortillo transportador horizontal y calentado por vapor, para el cocimiento acelerado de los granos en la suspensión alcalina (**Figura VI.1**). La cantidad de cal es usualmente entre <1% y 2% de la masa total de los granos de maíz mientras que el agua se añade en una proporción de 1 : 1 a 1 : 3 respecto a la masa de los granos de maíz. La temperatura de cocción es entre 70 – 100 °C, la cual se consigue usualmente mediante la inyección directa de vapor y se mantiene por un periodo relativamente corto (20 – 60 minutos). El grado de cocción se controla a través de variar la velocidad del tornillo transportador y la cantidad de vapor suministrado. Aproximadamente 1.5% – 2.5% de la materia seca original de los granos de maíz se pierde durante el cocimiento alcalino, compuesta de 50% – 60% de fibra dietética, 15% – 20% de ceniza, 15% de almidón, 5% – 10% de proteína, y <5% de lípidos. Estos sólidos de maíz así como la mayor parte de la cal salen del proceso en el licor de cocción, el cual normalmente se desecha como agua residual. Los granos de maíz parcialmente cocidos salen del pre-cocedor con un contenido de humedad de 32% – 37% (b.h.).

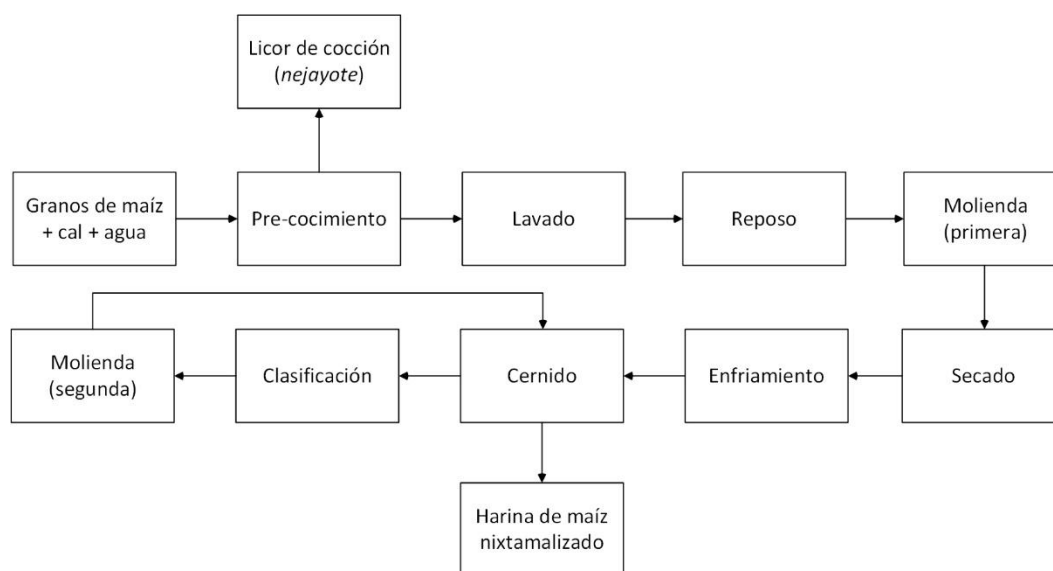


Figura VI.1. Principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.

Los granos de maíz pre-cocidos se transfieren a un lavador mecánico, comúnmente un barril horizontal rotatorio perforado equipado con aspersores de agua. Aquí, los granos de maíz se lavan

con agua presurizada a 60 – 90 °C durante 30 – 60 segundos a modo de remover el pericarpio ablandado así como los sólidos de maíz y la cal adheridos. El agua caliente también proporciona calor adicional para cocer aún más los granos. El agua resultante del lavado normalmente se re-utiliza en el pre-cocedor para de esta manera recuperar en alguna medida sólidos de maíz e incrementar el rendimiento de producción. La cantidad re-utilizada se regula a modo de mantener la concentración de sólidos totales en la suspensión de cocción entre 1% y 3%.

Los granos cocidos y lavados de maíz se dejan reposar en un pre-acondicionador, el cual puede ser un silo o una banda transportadora sinfín, durante aproximadamente 20 – 210 minutos con el propósito de estabilizar su contenido de humedad y así facilitar la posterior molienda y mejorar las características del producto molido. Al término de esta operación, la temperatura de los granos de maíz se reduce a 55 – 75 °C y su contenido de humedad se incrementa entre 2% y 3%.

Enseguida, los granos reposados se muelen en un molino de martillos o un molino de impacto. El producto molido, compuesto de partículas finas y gruesas, se seca generalmente mediante secado instantáneo con aire caliente a 190 – 230 °C durante 5 – 30 segundos para reducir rápidamente el contenido de humedad y cocer aún más las partículas de maíz. A lo largo de la operación de secado, la temperatura de las partículas de maíz no debe exceder 75 °C a fin de evitar daño por calor a la proteína y almidón del maíz. Un ciclón separador colecta las partículas secas de maíz, con un contenido de humedad de 12% a 18% (b.h.), al tiempo que expulsa el aire caliente de desecho, cuya temperatura es 90 – 180 °C. Las partículas secas de maíz se envían a un enfriador, por lo regular un ducto de enfriamiento a través del cual se hace circular una corriente de aire ambiente para reducir la temperatura de las partículas de maíz y su contenido de humedad a un valor entre 8% y 12% (b.h.). El enfriamiento también evita la eventual condensación de agua, así como la actividad microbiana en la HMN. Las partículas enfriadas de maíz se separan de la corriente de aire mediante un ciclón separador; el aire tibio de desecho se libera a una temperatura de 45 – 50 °C.

Después, las partículas de maíz se introducen en un cernidor mecánico para segregar las partículas finas ($\leq 250 \mu\text{m}$) que constituyen 30% – 35% de la masa total de maíz molido, de las partículas gruesas ($\geq 425 \mu\text{m}$) que conforma al 65% – 70% restante. Estas últimas se envían a un clasificador, típicamente un clasificador de aire, para separar la fibra ligera, la cual equivale al 3% – 10% de la masa total de maíz molido y que suele desecharse, de las partículas gruesas pesadas, las cuales se re-muelen en un segundo molino. Las partículas re-molidas se conducen de nueva cuenta al cernidor para su tamizado y posterior mezcla con las partículas finas resultantes de la primera molienda y así obtener la HMN con la composición deseada de los diferentes tamaños de partículas. El rendimiento de producción normalmente se encuentra en el rango de 86% a 95% (i.e. 0.86 – 0.95 kg de HMN por kg de granos limpios de maíz procesados).

VI.2.2 Suposiciones de cálculo

La base de cálculo fue una tonelada métrica (1,000 kg) de granos limpios de maíz. Se utilizó un modelo simplificado de un proceso genérico de producción de HMN (**Figura VI.2**). A partir del rango de valores reportados en las fuentes bibliográficas consultadas se fijaron las condiciones de operación para las principales operaciones unitarias en la fabricación de HMN. Para los granos de maíz (corriente 1 en **Figura VI.2**), se asumió una composición típica de la materia seca (**Tabla VI.1**) y un contenido de humedad de 14% (b.h.).

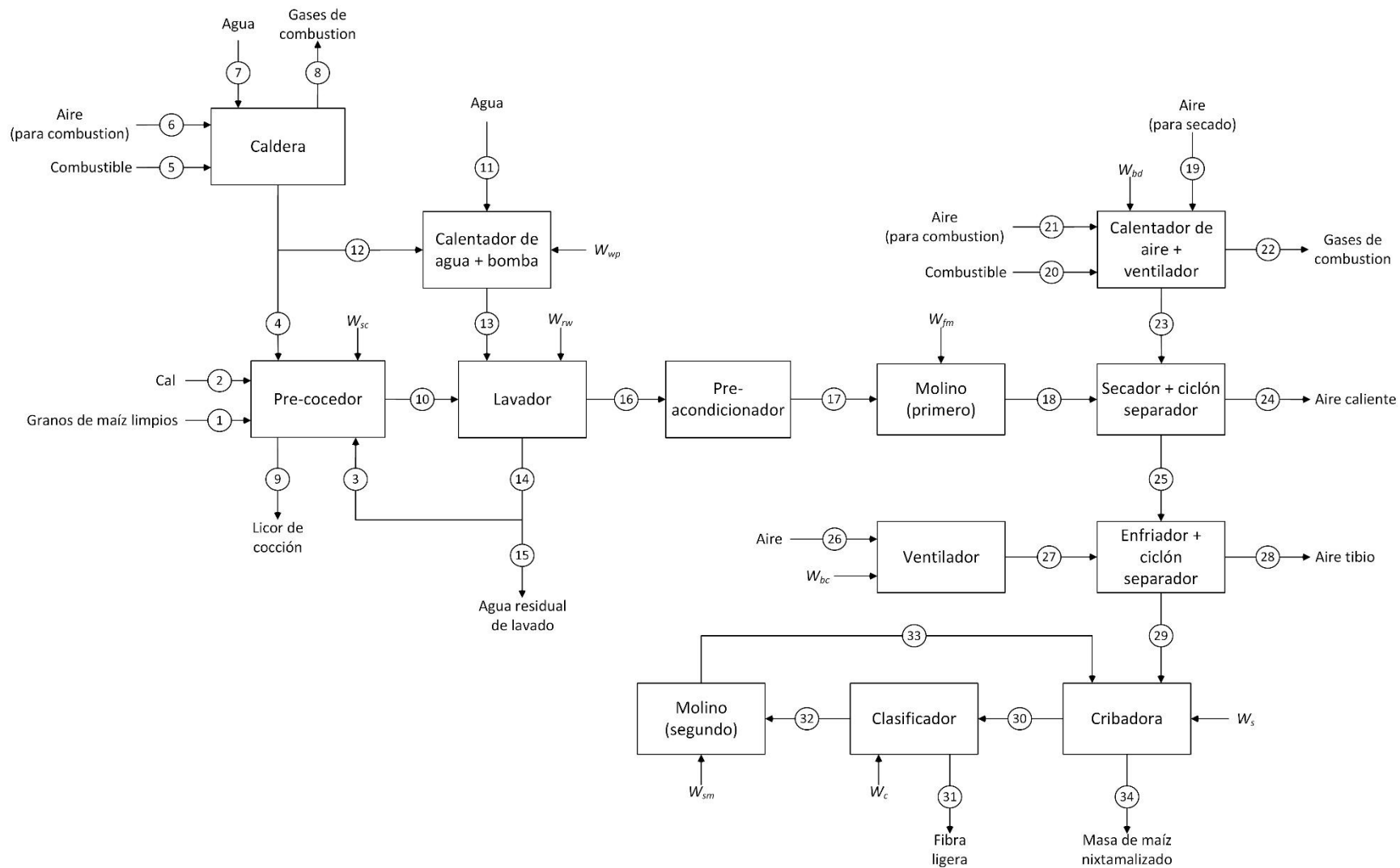


Figura VI.2. Diagrama del proceso simplificado genérico de producción de harina de maíz nixtamalizado utilizado en el presente estudio.

La cantidad de cal (corriente 2) utilizada se supuso igual a 1% de la masa de los granos de maíz y se eligió una proporción maíz : agua igual a 1.0 : 1.5 (en masa) en el pre-cocedor. El agua total suministrada al pre-cocedor se compuso de agua residual de lavado (corriente 3) y vapor saturado (corriente 4). Se supuso la utilización de vapor saturado a 120 °C producido en una caldera operada con gas natural (corriente 5), 50% de exceso de aire para combustión (corriente 6), y gases de combustión (corriente 8) a 250 °C (Engineering Toolbox, 2003). La temperatura de cocción fue 90 °C.

Las pérdidas de materia seca de maíz durante el pre-cocimiento se supusieron equivalentes a 2.5% de la materia seca original de los granos de maíz, compuestas de la siguiente manera: 60% fibra dietética, 15% ceniza, 15% almidón, 5% proteína, y 5% lípidos. La cal absorbida por los granos pre-cocidos de maíz representó 0.2% de su contenido total de materia seca. El resto de la cal fue desechado. Se asumió que el 70% del total de las pérdidas de materia seca de maíz y cal durante la cocción salieron del proceso con el licor de cocción (corriente 9) y el otro 30% se adhirió a la superficie de los granos pre-cocidos de maíz (corriente 10). La temperatura de salida del licor de cocción y de los granos pre-cocidos fue 90 °C; el contenido de humedad de estos últimos se fijó en 35% (b.h.).

Tabla VI.1. Composición típica de la materia seca de los granos de maíz (Watson, 2003)

Componente	[% del total] ^a
Almidón	73.4
Lípidos	4.4
Proteína	9.1
Ceniza	1.4
Azúcares	1.9
Fibra dietética	9.8

^a En base seca.

El agua limpia a temperatura ambiente (corriente 11) para el lavado de los granos pre-cocidos de maíz se calienta en un calentador de agua con la inyección de directa de vapor saturado a 120 °C (corriente 12) y después se presuriza a 80 psi(g) (Featherstone, 2015) mediante una bomba convencional. El agua caliente de lavado (corriente 13) remueve los sólidos de maíz y la cal adherida en los granos pre-cocidos de maíz. La porción del total del agua residual de lavado (corriente 14) que se re-usa en el pre-cocedor se calculó a modo de que la concentración de sólidos en la suspensión de cocción alcanzara 2%; se supuso que el resto se desecha (corriente 15). La temperatura de salida del agua residual de lavado y de los granos lavados de maíz (corriente 16) se asumió igual 80 °C. En base a estas suposiciones, se determinó la temperatura inicial del agua caliente para lavado.

Nótese que, considerando el incremento en el contenido de humedad de los granos de maíz durante la etapa de pre-acondicionamiento, se supuso que la cantidad correspondiente de agua abandona el lavador junto con la masa de granos lavados de maíz. La temperatura y el contenido de humedad de salida de los granos de maíz reposados (corriente 17) se establecieron en 55 °C y 37% (b.h.), respectivamente.

Se consideró un incremento de temperatura de 10 °C en los granos de maíz molidos obtenidos de la primera molienda (corriente 18) (Appel, 1987). La composición de la materia seca y el contenido de humedad del maíz molido se mantuvieron sin cambios. La distribución de tamaños de partículas estimada para la primera molienda se detalla en la **Tabla VI.2**.

Para la operación de secado, se supuso que aire limpio a 25 °C y humedad relativa de 50% (corriente 19) se calienta indirectamente a 210 °C en un calentador de aire con gas natural (corriente 20), 50% de aire de combustión en exceso (corriente 21), y gases de combustión expulsados a 250 °C (corriente 22). El aire de secado (corriente 23) se introduce al secador para reducir el contenido de humedad de las partículas de maíz hasta 13% (b.h.). La temperatura de salida del aire caliente de desecho (corriente 24) se asumió igual a 95 °C y la de las partículas secas de maíz (corriente 25) igual a 75 °C.

La cantidad de aire ambiente limpio para la operación de enfriamiento (corriente 26) se determinó como la necesaria para bajar la temperatura de las partículas secas de maíz a 25 °C y su contenido de humedad a 10% (b.h.). En base a lo anterior, se determinó la temperatura de salida del aire tibio de desecho (corriente 28).

Tabla VI.2. Distribución de tamaños de partículas estimada para la primera y segunda molienda y para la harina de maíz nixtamalizado.

Fracciones	Tamaño de partícula	Prmera molienda	Segunda molienda	Harina de maíz nixtamalizado ^a
	[μm]	[% del total]	[% del total]	[% del total]
Fracción gruesa	2,800	1.0	-	-
	2,000	3.0	-	-
	1,400	12.0	-	-
	850	32.0	-	-
	425	22.0	8.7	6.0
Fracción fina	250	15.0	50.0	50.0
	180	10.0	31.4	32.0
	150	5.0	9.9	12.0

^a Con información tomada de (Figueroa-Cárdenas et al., 2016)

De la masa total de las partículas de maíz molido enviadas al cernidor (corriente 29), se asumió que el 70% son partículas gruesas de tamaño $\geq 425 \mu\text{m}$ (corriente 30) y el restante 30% son partículas finas de tamaño $\leq 250 \mu\text{m}$, en concordancia con la distribución de tamaños de partículas de la primera molienda. El residuo de fibra ligera separado en el clasificador (corriente 31) se supuso equivalente a 4% de la masa total de maíz molido introducido al cernidor. Asimismo, se asumió que este residuo se compone de fibra dietética con una cantidad proporcional de humedad y cal de tal manera que las partículas gruesas pesadas (corriente 32) mantuvieron el mismo contenido de humedad y cal que las partículas maíz a la salida del enfriador.

La distribución de tamaños de partículas de la segunda molienda se estimó en base a las distribuciones de tamaños de partículas asumidas para la primera molienda y la harina de maíz nixtamalizado (**Tabla VI.2**). Se consideró que como resultado de la segunda molienda la temperatura de las partículas gruesas pesadas re-molidas (corriente 33) se incrementa 15 °C respecto a su temperatura de entrada (Appel, 1987). Se asumió que esta energía térmica se disipa durante el posterior transporte de las partículas re-molidas al cernidor. La harina de maíz nixtamalizado (corriente 34) sale del cernidor a temperatura de 25 °C y contenido de humedad de 10% (b.h.).

VI.2.3 Balances de materia y energía

Se realizaron los balances de materia y energía para cada una de las principales operaciones unitarias necesarias para la fabricación de HMN a fin de estimar las propiedades de todas las corrientes de proceso y en base a ello cuantificar el uso total de energía y las emisiones de GEI. Se utilizó la ecuación de balance de materia en estado estacionario:

$$\sum_i m_{in,i} = \sum_i m_{out,i} \quad (\text{VI.1})$$

De la misma manera, se empleó la ecuación de balance de energía para sistemas abiertos en estado estacionario:

$$Q - W = \Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p \quad (\text{VI.2})$$

Los cambios en la E_k y E_p fueron ignorados, de modo que la **Ec. (VI.2)** se simplificó a:

$$Q - W = \Delta H = \sum_i H_{out,i} - \sum_i H_{in,i} \quad (\text{VI.3})$$

Donde:

$$\sum_i H_i = \sum_i (mh)_i \quad (\text{VI.4})$$

Los cambios en la h se evaluaron con la siguiente expresión:

$$\Delta h = \int_{T_0}^T c_p dT \quad (\text{VI.5})$$

Las c_p como función de la temperatura se recopilaron de fuentes bibliográficas (**Tabla VI.3**). La T_0 se fijó en 25 °C. La c_p de una mezcla de varios componentes se estimó como el promedio ponderado de las c_p de estos últimos, esto es:

$$c_p = \frac{\sum_i c_{p,i} X_i}{\sum_i X_i} \quad (\text{VI.6})$$

La composición del gas natural se tomó como sigue: 78% CH₄, 15% C₂H₆, y 7% C₃H₈ (en masa) (PEMEX, 2000) y su poder calorífico se calculó en aproximadamente 40.69 MJ m⁻³, conforme a los calores estándar de combustión del CH₄ (-890.35 kJ mol⁻¹), C₂H₆ (-1,559.87 kJ mol⁻¹), y C₃H₈ (-2,204.05 kJ mol⁻¹) (Ghasem y Henda, 2015). Se asumió la combustión completa del gas natural.

Tabla VI.3. Capacidades térmicas específicas a presión constante (c_p) como función de la temperatura (Chase, 1998; Ghasem y Henda, 2015; Singh y Heldman, 2014)

Sustancia	Ecuación ^d	Unidades
Cal ^a	$1.7657 - 1.11606T + 1.6577T^2 - 6.8012 \times 10^{-1}T^3 - 3.3919 \times 10^{-2}T^{-2}$	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
Agua (l)	$4.1762 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
Agua (g)	$1.8573 + 3.7746 \times 10^{-4}T + 4.2209 \times 10^{-7}T^2 - 1.9944 \times 10^{-10}T^3$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
Carbohidratos ^b	$1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
Proteínas	$2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
Lípidos	$1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
Fibra ^c	$1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
Ceniza	$1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
CO ₂ (g)	$0.8205 + 9.6185 \times 10^{-4}T - 6.5600 \times 10^{-7}T^2 + 1.6960 \times 10^{-10}T^3$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
N ₂ (g)	$1.0352 + 7.8496 \times 10^{-5}T + 2.0429 \times 10^{-7}T^2 - 1.0248 \times 10^{-10}T^3$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
O ₂ (g)	$0.9094 + 3.6190 \times 10^{-4}T - 1.8989 \times 10^{-7}T^2 + 4.0971 \times 10^{-11}T^3$	[kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]

^a Hidróxido de calcio (Ca(OH)₂). ^b Utilizada para el almidón y el azúcar del maíz. ^c Utilizada para la fibra dietética del maíz.

^d Temperaturas en °C, excepto por Cal donde T está dada en K/1000.

La composición del aire ambiente se supuso como sigue: 77% N₂ y 23% O₂ (en masa) y la h_a se calculó con la fórmula (Singh y Heldman, 2014):

$$h_a = 1.005(T - T_0) + HR[h_L + 1.88(T - T_0)] \quad (\text{VI.7})$$

En la cual el h_L fue aquel a la temperatura T, en tanto que la T_0 se estableció en 25 °C.

La energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del tornillo transportador del pre-cocedor se calculó conforme al procedimiento descrito en (Continental, 1986). La energía eléctrica para elevar la presión del agua caliente para lavado se estimó considerando el V_{hm} y la diferencia de presiones deseada (Oloman, 2009):

$$W_{wp} = V_{hw}(P_{out} - P_{in}) \quad (\text{VI.8})$$

La eficiencia global de la bomba de agua se asumió igual a 60%. La energía eléctrica para la operación del lavador mecánico se supuso igual a 1.17 kWh ton⁻¹ de material lavado (Saravacos y Kostaropoulos, 2016). Aquella necesaria para la primera molienda se estableció en aproximadamente 18.72 kWh ton⁻¹ de producto molido (Diez de Sollano y Berriozabal, 1955), considerando una eficiencia del motor eléctrico del molino de martillos de 85%. Estos requerimientos de energía también se utilizaron para estimar la energía necesaria para la segunda molienda utilizando la Ley de Bond, la cual calcula la energía para molienda en función de los tamaños de partícula inicial y final y el W_i , según la ecuación abajo mostrada (McCabe et al., 1993):

$$E_g = 0.3162Wi \left(\frac{1}{\sqrt{D_{final}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{initial}}} \right) \quad (\text{VI.9})$$

Donde E_g está en kWh kg⁻¹. El Wi expresa la energía necesaria para reducir una partícula muy grande a un tamaño tal que 80% del producto molido pasa a través de una tamiz de 100 µm (McCabe et al., 1993). Dado que el Wi es específico para cada material, la **Ec. (VI.9)** puede usarse para aproximar la energía para molienda a diferentes niveles de reducción de tamaño (Earle, 1983; McCabe et al., 1993). De ahí que, el Wi para granos pre-cocidos de maíz se estimó a partir de la información disponible para la primera molienda y después este valor se utilizó en la **Ec. (VI.9)** para obtener los requerimientos de energía para la segunda molienda. El tamaño de partícula inicial previo a la primera molienda se tomó igual al grosor promedio de un grano de maíz con un contenido de humedad de 37% (b.h.), el cual fue calculado con la siguiente expresión (Sangamithra, 2016):

$$Th = 4.288 + 0.056MC \quad (\text{VI.10})$$

En la cual, el MC está dado en b.s. y en forma fraccionaria. El tamaño de partícula final se igualó al tamaño promedio ponderado de las partículas molidas según la distribución de tamaños de partículas supuesta para la primera molienda (**Tabla VI.2**). Para la segunda molienda, el tamaño de partícula inicial correspondió al tamaño promedio ponderado de la fracción de partículas gruesas resultantes de la primera molienda, mientras que el tamaño de partícula final se asumió igual al tamaño promedio ponderado de las partículas molidas de acuerdo con la distribución de tamaños de partículas estimada para la segunda molienda (**Tabla VI.2**).

La energía eléctrica necesaria para accionar el ventilador de aire asociado al secador se determinó con la fórmula mostrada a continuación (Oloman, 2009):

$$W_{bd} = P_{in} V_{ha} \left(\frac{r}{r-1} \right) \left[\left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{r-1}{r}} - 1 \right] \quad (\text{VI.11})$$

El valor de r para el aire se tomó igual a 1.4 (Oloman, 2009). Esta misma fórmula se utilizó para calcular la energía eléctrica que demanda el ventilador de aire del enfriador en base al volumen de aire ambiente necesario para la operación de enfriamiento. En ambos casos, la presión de salida se fijó en 30.0 cm de columna de agua (ca. 104.24 kPa(abs)) y la eficiencia global del ventilador en 60%. La energía eléctrica requerida para la operación del cernidor se supuso igual a 0.52 kWh ton⁻¹ de material alimentado (Palamatic, n.d.) y aquella para el clasificador igual a 7.23 kWh ton⁻¹ de material alimentado (Nisshin Engineering, n.d.).

Obsérvese que se asumió que la energía eléctrica suministrada para la operación del tornillo transportador del pre-cocedor, del lavador mecánico, del cernidor, y del clasificador se disipa completamente (e.g. en forma de calor o ruido). Análogamente, una parte de la energía eléctrica necesaria para la primera y segunda molienda se convierte en calor que eleva la temperatura del producto molido y el resto se supuso que se disipa. Por otra parte, la energía eléctrica asociada al bombeo del agua caliente para lavado y a los ventiladores de aire para el secado y el enfriamiento de las partículas de maíz, se incorporó al contenido energético de las respectivas corrientes de proceso de acuerdo con la **Ec. (VI.3)**. Se ignoraron pérdidas adicionales de energía en los equipos considerados. La energía asociada al trabajo humano y la embutida en maquinaria e infraestructura también fueron ignoradas. Los equivalentes energéticos del gas natural (40.69 MJ m⁻³) y electricidad

(3.60 MJ kWh⁻¹) se multiplicaron por los factores 1.07 (GREET, 2015) y 2.74 (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018), respectivamente, a fin de contabilizar la energía usada en el procesamiento *aguas arriba* del gas natural y la generación de electricidad.

VI.2.4 Estimación de las emisiones de GEI

El cálculo de las emisiones de GEI se limitó a las emisiones de CO₂, N₂O, y CH₄ asociadas al uso de energía en el proceso de producción de la HMN. Para el gas natural, se emplearon factores de emisión por defecto (56.10 g CO₂, 1.00 × 10⁻³ g CH₄, 1.00 × 10⁻⁴ g N₂O por MJ de energía) (IPCC, 2006). Las emisiones de GEI relacionadas con el procesamiento *aguas arriba* del gas natural (4.71 g CO₂, 93.99 × 10⁻³ g CH₄, 33.10 × 10⁻⁶ g N₂O por MJ) (GREET, 2015) también fueron consideradas. En el caso de la electricidad, los factores de emisión (612.40 g CO₂, 8.84 × 10⁻¹ g CH₄, 4.45 × 10⁻³ g N₂O por kWh) están basados en la mezcla de combustibles y la eficiencia de generación promedio en el país e incorporan las emisiones de GEI del procesamiento *aguas arriba* de los combustibles fósiles utilizados (Juárez-Hernández y Sheinbaum, 2018). Las emisiones de GEI embutidas en insumos materiales, maquinaria, e infraestructura no fueron contabilizadas. Se aplicaron los potenciales de calentamiento mundial a 100 años (1 para CO₂, 298 para N₂O, 25 para CH₄) (IPCC, 2007) a las emisiones de GEI estimadas para convertirlas a unidades de CO₂ equivalente (CO₂e).

VI.3 Resultados

Los flujos de materia estimados para el proceso de producción de HMN se muestran en la **Figura VI.3** y los correspondientes a los principales componentes de la HMN, es decir, agua, granos de maíz y cal, se ilustran en la **Figura VI.4**. La demanda total estimada de agua fresca ascendió a cerca de 2.18 m³ por tonelada de granos de maíz limpios procesada. Aproximadamente 12% de ésta se utiliza en la generación de vapor y el restante 88% se utiliza en el calentador de agua para la preparación del agua caliente para lavado. Cerca de dos tercios del vapor saturado generado se usa en el calentador de agua y el resto se inyecta en el pre-cocedor para elevar la temperatura de cocción. De ahí que, se estimó que la gran mayoría del agua suministrada (ca. 96% del total) se emplea en el lavado de los granos pre-cocidos de maíz (**Figura VI.5**).

De la masa total de agua residual de lavado generada, cerca de 70% se re-utiliza en pre-cocedor para la cocción alcalina de los granos de maíz. La masa de agua en el licor de cocción desechado equivale a más de la mitad (ca. 55%) del total de agua suministrada al proceso. Tomando en cuenta el agua residual de lavado no re-utilizada, se calculó que alrededor de 84% del agua limpia necesaria para la fabricación de HMN es descargada como agua residual. El restante 16% es retenida temporalmente por los granos de maíz, para luego eliminarse mediante las posteriores operaciones de secado y enfriamiento.

El rendimiento de HMN resultó cercano a 90% (i.e. 896 kg de HMN por tonelada métrica de granos de maíz crudos), de manera que el consumo específico de agua se estimó cercano a 2.43 m³ por tonelada de HMN elaborada.

Los flujos de energía calculados para el proceso de producción de HMN se muestran en la **Figura VI.6**. El uso total de energía resultó cercano a 2.69 GJ por tonelada de granos de maíz limpios procesados, la mayoría de esta energía provino de gas natural (**Figura VI.7**).

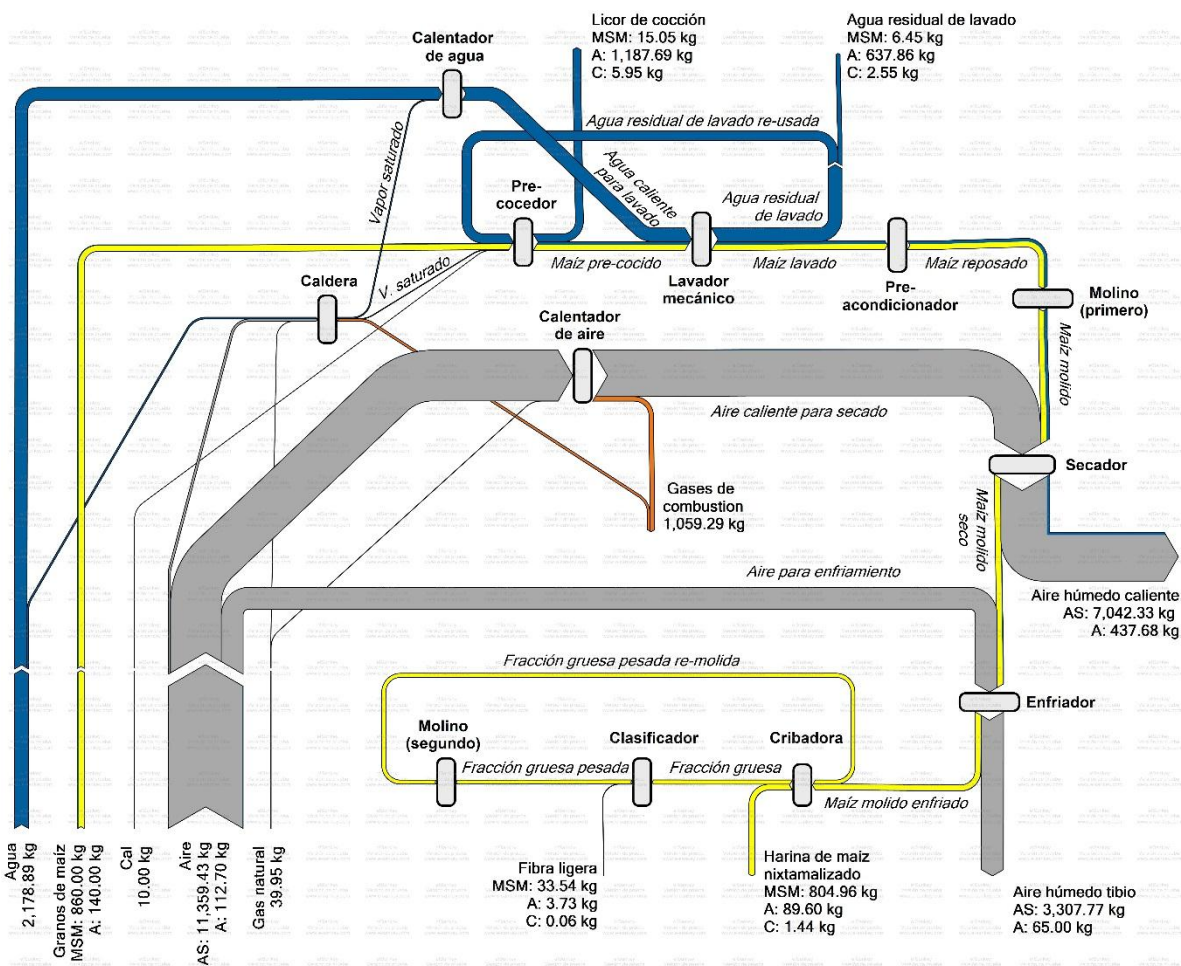


Figura VI.3. Diagrama tipo Sankey de los flujos estimados de materia en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado. MSM, materia seca de los granos de maíz; A, agua; C, cal; AS, aire seco.

Al incluir el uso de energía en el procesamiento aguas arriba del gas natural y la generación de electricidad, el uso total de energía ascendió a casi 3.24 GJ por tonelada de granos de maíz limpios, con una participación dominante del gas natural y la electricidad (**Figura VI.8**). En ambos casos, las formas de energía comercial (i.e. gas natural y electricidad) representaron alrededor de 90% del total de energía suministrada. La distribución estimada del uso total de energía entre las operaciones unitarias consideradas se muestra en las **Figuras VI.9** y **VI.10**. En conjunto, las operaciones de secado, lavado, y pre-cocimiento absorbieron la mayor proporción de la energía utilizada. Casi dos tercios de la energía del gas natural se ocupa en calentar el aire para el secado y el otro tercio se utiliza en la producción de vapor, la mayor parte del cual se emplea en la preparación del agua caliente para el lavado de los granos de maíz pre-cocidos. Asimismo, alrededor de 80% de la energía eléctrica requerida se utiliza para el funcionamiento de los molinos y el ventilador de aire asociado al secador. En base al rendimiento calculado de HMN, el uso específico de energía se estimó en aproximadamente 3.00 GJ por tonelada de HMN producida. Al añadir el uso de energía aguas arriba en la producción de gas natural y electricidad, el uso específico de energía resultó cercano a 3.62 GJ por tonelada de HMN. La composición, temperatura, y entalpía estimadas para las principales corrientes de proceso se detallan en la **Tabla VI.4**.

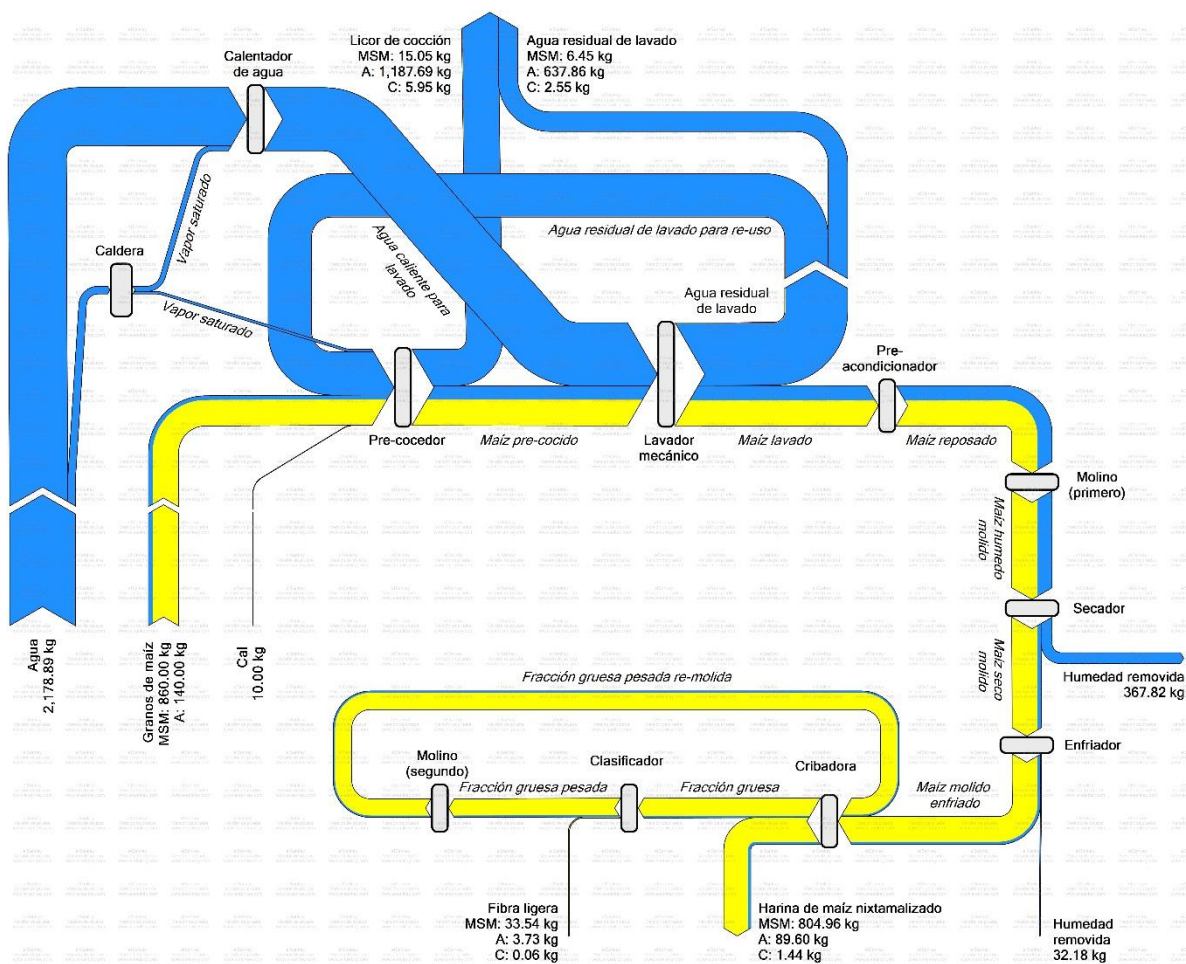


Figura VI.4. Diagrama tipo *Sankey* de los flujos estimados de agua, maíz, y cal en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado. *MSM*, materia seca de los granos de maíz; *A*, agua; *C*, cal.

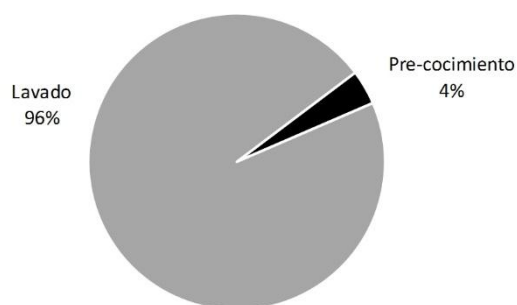


Figura VI.5. Distribución del consumo total estimado de agua entre las principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.

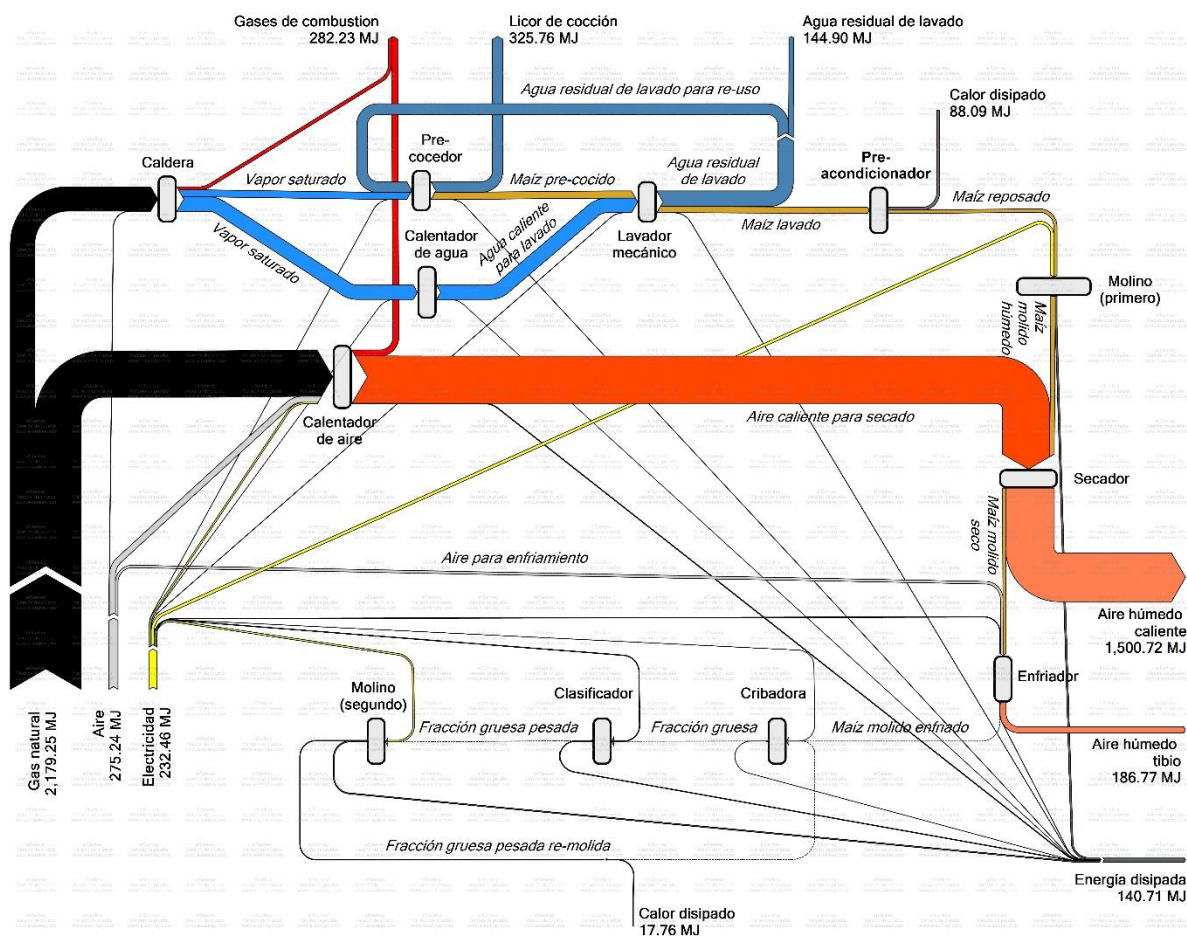


Figura VI.6. Diagrama tipo Sankey de los flujos estimados de energía en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.

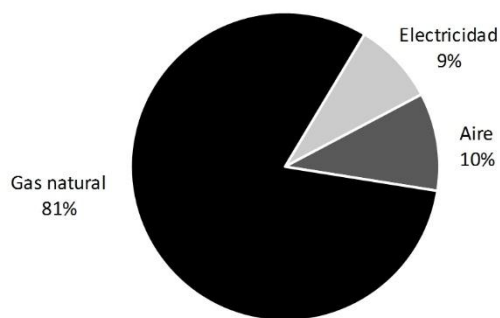


Figura VI.7. Participación relativa de los insumos energéticos en el uso total de energía estimado en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado.

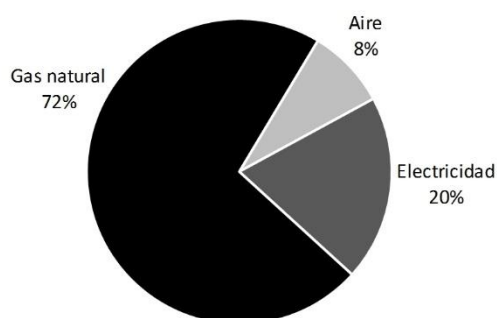


Figura VI.8. Participación relativa de los insumos energéticos en el uso total de energía estimado en el proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado, contabilizando el uso de energía *aguas arriba* en el procesamiento del gas natural y la generación de electricidad.

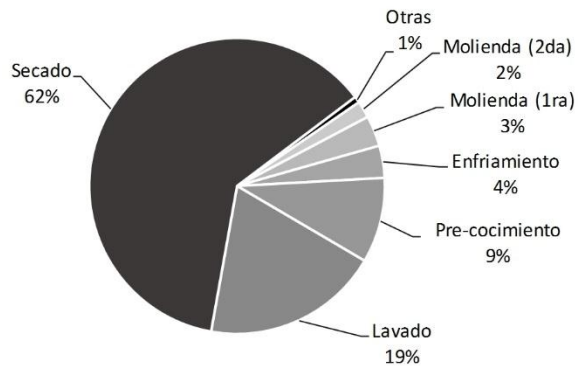


Figura VI.9. Distribución del uso total estimado de energía entre las principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado. *Otras* incluye pre-acondicionamiento, cernido, y clasificación.

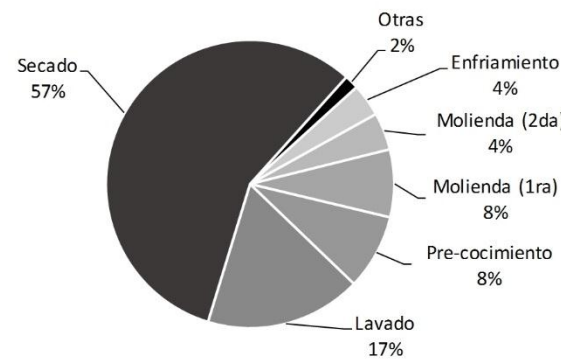


Figura VI.10. Distribución del uso total estimado de energía entre las principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado, contabilizando el uso de energía *aguas arriba* en el procesamiento del gas natural y la generación de electricidad. *Otras* incluye pre-acondicionamiento, cernido, y clasificación.

Las emisiones totales de GEI se estimaron en torno a 178.84 kg CO₂e por tonelada de granos de maíz limpios procesados, es decir, alrededor de 199.60 kg CO₂e por tonelada de HMN elaborada. Aproximadamente 77% de las emisiones totales de GEI emanaron de la quema de gas natural y el restante 23% de la generación de la electricidad utilizada en el proceso de producción. Las emisiones de CO₂ representaron casi 96% de las emisiones de GEI totales, las de CH₄ alrededor de 4%, y las de N₂O <1%. La mayor parte de las emisiones de GEI se atribuyó al uso de energía en las operaciones de secado, lavado, y pre-cocimiento, las cuales en conjunto fueron responsables de más de 80% de las emisiones de GEI totales (**Figura VI.11**).

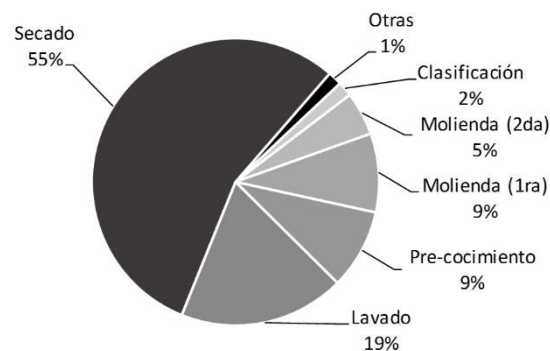


Figura VI.11. Distribución de las emisiones totales estimadas de gases de efecto invernadero entre las principales operaciones unitarias del proceso de producción de harina de maíz nixtamalizado. *Otras* incluye pre-acondicionamiento, cernido, y enfriamiento.

Tabla VI.4. Composición, temperatura (*T*), y entalpía (*H*) de las principales corrientes de proceso en la producción de harina de maíz nixtamalizado.

Corriente ^a	Descripción	MSM ^b	Agua	Cal	GN ^c	Aire seco	VA ^c	CO ₂	H ₂ O ^d	N ₂	O ₂	<i>T</i>	<i>H</i>
												[°C]	[kJ]
						[kg]							
1	Granos de maíz limpios	860.00	140.00	-	-	-	-	-	-	-	-	25.00	-
2	Cal	-	-	10.00	-	-	-	-	-	-	-	25.00	-
3	Agua residual de lavado re-usada	14.33	1,417.47	5.67	-	-	-	-	-	-	-	80.00	331,098.75
4	Vapor saturado	-	82.53	-	-	-	-	-	-	-	-	120.00	214,703.96
5	Gas natural	-	-	-	13.77	-	-	-	-	-	-	25.00	751,042.30
6	Aire ambiente limpio	-	-	-	-	347.84	3.45	-	-	-	-	25.00	8,428.35
7	Agua limpia	-	254.54	-	-	-	-	-	-	-	-	25.00	-
8	Gases de combustión	-	-	-	-	-	3.45	38.41	29.37	266.83	27.01	250.00	97,265.62
9	Licor de cocción	15.05	1,187.69	5.95	-	-	-	-	-	-	-	90.00	325,764.10
10	Granos de maíz pre-cocidos	859.28	452.31	9.72	-	-	-	-	-	-	-	90.00	220,038.61
11	Agua limpia	-	1,924.35	-	-	-	-	-	-	-	-	25.00	-
12	Vapor saturado	-	172.01	-	-	-	-	-	-	-	-	120.00	447,501.06
13	Agua caliente para lavado	-	2,096.36	-	-	-	-	-	-	-	-	76.12	448,657.67
14	Agua residual de lavado	20.78	2,055.33	8.22	-	-	-	-	-	-	-	80.00	475,999.38
15	Agua residual de lavado desechada	6.45	637.86	2.55	-	-	-	-	-	-	-	80.00	144,900.63
16	Granos de maíz lavados	838.50	493.33	1.50	-	-	-	-	-	-	-	80.00	192,696.91
17	Granos de maíz reposados	838.50	493.33	1.50	-	-	-	-	-	-	-	55.00	104,610.24
18	Granos de maíz molidos	838.50	493.33	1.50	-	-	-	-	-	-	-	65.00	139,749.01
19	Aire ambiente limpio	-	-	-	-	7,042.33	69.87	-	-	-	-	25.00	170,637.55
20	Gas natural	-	-	-	26.18	-	-	-	-	-	-	25.00	1,428,210.31
21	Aire ambiente limpio	-	-	-	-	661.47	6.56	-	-	-	-	25.00	16,027.67
22	Gases de combustión	-	-	-	-	-	6.56	73.04	55.85	507.41	51.35	250.00	184,963.97
23	Aire caliente para secado	-	-	-	-	7,042.33	69.87	-	-	-	-	210.00	1,458,999.46
24	Aire caliente de desecho	-	-	-	-	7,042.33	437.68	-	-	-	-	95.00	1,500,724.98
25	Maíz molido seco	838.50	125.52	1.50	-	-	-	-	-	-	-	75.00	98,023.50
26	Aire ambiente limpio	-	-	-	-	3,307.77	32.82	-	-	-	-	25.00	80,148.24
27	Aire para enfriamiento	-	-	-	-	3,307.77	32.82	-	-	-	-	28.64	88,743.40
28	Aire tibio de desecho	-	-	-	-	3,307.77	65.00	-	-	-	-	35.78	186,766.90
29	Maíz molido enfriado	838.50	93.33	1.50	-	-	-	-	-	-	-	25.00	-
30	Partículas de maíz gruesas	586.95	65.33	1.05	-	-	-	-	-	-	-	25.00	-
31	Residuo de fibra ligera	33.54	3.73	0.06	-	-	-	-	-	-	-	25.00	-
32	Partículas de maíz gruesas pesadas	553.41	61.60	0.99	-	-	-	-	-	-	-	25.00	-
33	Partículas de maíz gruesas pesadas re-molidas	553.41	61.60	0.99	-	-	-	-	-	-	-	40.00	17,761.91
34	Harina de maíz nixtamalizado	804.96	89.60	1.44	-	-	-	-	-	-	-	25.00	-

^a Véase la **Figura VI.2.** ^b Materia seca de los granos de maíz. ^c Gas natural. ^d Vapor de agua en el aire ambiente. ^e Vapor de agua producto de la reacción de combustión.

VI.4. Discusión

En términos cuantitativos, el aire ambiente domina en el balance de masa del proceso de producción de la HMN fundamentalmente debido a la gran cantidad de aire que demanda el secado de los granos de maíz molidos. El agua es segunda en importancia, siendo las operaciones de secado y, en menor medida, pre-cocimiento las más intensivas en consumo de agua. En el presente estudio se asumió que una parte del agua residual de lavado se re-utiliza en el pre-cocedor, lo cual ayuda a disminuir el consumo total de agua y los requerimientos totales de energía térmica. Como consecuencia de ello, solo una cantidad relativamente pequeña de agua en forma de vapor saturado se usa directamente en el pre-cocedor. Sin embargo, la gran mayoría del agua suministrada al proceso es desechada como parte del licor de cocción y el agua residual de lavado. La distribución de los flujos estimados de agua sugiere que el agua se utiliza principalmente como auxiliar en procesos de transferencia de materia y energía, sobre todo los relacionados con el cocimiento, reblandecimiento, y lavado de los granos de maíz. Obsérvese que el agua incorporada en el producto final es muy similar a la de los granos de maíz crudos.

Una opción posible para reducir el consumo de agua y la generación de aguas residuales en la fabricación de HMN consiste en re-utilizar o reciclar una proporción mayor de los efluentes antes mencionados (Domínguez-Espinosa y Pacho-Carrillo, 2003). En la producción de masa de nixtamal, por ejemplo, el re-uso de la suspensión de cocción para el cocimiento alcalino de los granos de maíz redujo notoriamente la generación de aguas residuales, el consumo de agua potable, y el uso de energía térmica en comparación con el proceso convencional (Lee y Okos, 2011). Esta estrategia podría también contribuir a disminuir las pérdidas de materia seca del maíz, y así eventualmente incrementar el rendimiento de producción y minimizar la carga ambiental asociada a los efluentes (Freudenrich et al., 2005; Hernández et al., 1984; Ramírez et al., 2009). No obstante, una cuestión de importancia relacionada con la re-utilización de aguas residuales sin tratamiento previo es la posible acumulación de sólidos de maíz y cal en el agua de proceso (Lee y Okos, 2011), lo cual podría afectar negativamente la calidad del producto final.

La concentración de sólidos totales en las aguas residuales de las industrias del procesamiento del maíz puede reducirse mediante el empleo de diferentes sistemas de tratamiento, consiguiéndose con ello una baja en su carga contaminante y otros posibles beneficios añadidos (Domínguez-Espinosa y Pacho-Carrillo, 2003). Por ejemplo, el licor de cocción y el agua residual de lavado podrían ser tratadas en sistemas anaerobios para generar de biogás y usar este último para cubrir la demanda energética del proceso de producción (Durán-Domínguez, 1996). Otra posibilidad es aplicar un tratamiento a dichos efluentes para la obtención de sub-productos químicos de valor agregado como enzimas (Domínguez-Espinosa y Pacho-Carrillo, 2003). Las aguas residuales así tratadas podrían ser re-utilizadas un mayor número de veces en las operaciones de pre-cocimiento y lavado, siempre y cuando cumplan ciertos estándares de calidad. Nótese que las pérdidas de materia seca de los granos del maíz durante el pre-cocimiento y el lavado está determinadas en gran medida por las características de los granos, la temperatura de cocción, y la concentración de cal (Sahai et al., 2000). Por lo tanto, es de esperar que el contenido de materia orgánica de las aguas residuales del procesamiento del maíz varía de una planta a otra, al igual que la opción de tratamiento más adecuada. El tratamiento de las aguas residuales de la industria del procesamiento del maíz se justifica también por razones ambientales dado que estos efluentes tienen altas concentraciones de sólidos y alcalinidad, por lo que demandan un manejo y disposición adecuados (Eckhoff et al., 2006; Rivero-Jimenez y Quintanar-Guzman, 2006).

Otra posible vía para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la producción de HMN es la minimización del consumo de agua y la generación de aguas residuales mediante, por ejemplo, modificaciones en el proceso de producción y los equipos utilizados (Domínguez-Espinosa y Pachó-Carrillo, 2003). En este sentido, la relación maíz : agua en el pre-cocedor podría ajustarse a la baja dado que los valores reportados para esta variable fluctúan en un rango amplio. Nótese que una relación maíz : agua de 1.0 : 1.0 parece común en instalaciones industriales, lo que se traduce en consumos de agua potable de sólo 1.00 - 1.50 m³ por tonelada de HMN producida (DISA, 1982, 1980; Facio, 1991; Hernández et al., 1984; IDTA, 1984). Sin embargo, no se especifica si estos consumos incluyen el agua utilizada en el lavado de los granos pre-cocidos. Puesto que la relación maíz : agua en el pre-cocedor influye notoriamente en los requerimientos de agua para la producción de HMN, el ajuste de este parámetro podría reportar ahorros considerables en el consumo de agua.

El método de cocción alcalina también podría modificarse con el objetivo de reducir el consumo de agua. Se han desarrollado varias técnicas alternativas de cocción alcalina que los requerimientos de agua, las pérdidas de materia seca del maíz, y la generación de aguas residuales. Algunos ejemplos de estas técnicas novedosas son la nixtamalización fraccionada o selectiva (Eckhoff et al., 2006; Rivero-Jimenez y Quintanar-Guzman, 2006; Vaqueiro y Reyes, 1986), la nixtamalización a alta temperatura y presión (Martínez-Bustos et al., 2002; Rubio et al., 2002), y el cocimiento alcalino por extrusión (Martínez-Bustos et al., 1996). Además de las ventajas antes mencionadas, se asegura que estos procesos alternativos reducen los requerimientos de energía para las operaciones de cocimiento y lavado, acortan los tiempos de procesamiento, e incrementan los rendimientos de producción. Las opciones de conservación de agua arriba esbozadas deben examinarse cuidadosamente antes de implementarlas a fin de identificar posibles efectos adversos en la calidad del producto final al igual que en los niveles de uso de otros insumos, como la energía. Por ejemplo, se reporta que algunos de los procesos alternativos de cocción alcalina producen HMN de menor calidad comparada con la obtenida usando el método convencional (McDonough et al., 2001; Rooney y Serna-Saldivar, 2003a).

El uso total estimado de energía comercial ascendió a casi 2.69 GJ por tonelada de HMN producida (o bien, ca. 3.31 GJ ton⁻¹ si se incluye el uso de energía *aguas arriba*), del cual 90% corresponde a gas natural y 10% a electricidad (ca. 79% y 21%, respectivamente, considerando el uso de energía *aguas arriba*). La información pública disponible sobre el uso de energía en la producción industrial de HMN proviene de estudios de factibilidad económica de plantas de producción de HMN realizados durante el periodo de 1980 – 1990 (DISA, 1982, 1980; Facio, 1991; Hernández et al., 1984; IDTA, 1984). Los valores reportados de uso específico de energía van de 2.62 a 4.15 GJ por tonelada de HMN elaborada (3.13 GJ ton⁻¹, en promedio), del cual la energía térmica representa 80% - 88% (85% en promedio) y la energía eléctrica 12% - 20% (15% en promedio). Obsérvese que estos valores no contabilizan el uso de energía *aguas arriba* en el procesamiento de los combustibles fósiles y la generación de electricidad.

La diferencia más significativa con los valores aquí computados se encuentra en los requerimientos de energía eléctrica, los cuales son 25% a 164% (85% en promedio) menores a los reportados en los estudios de factibilidad económica de plantas de HMN arriba citados. Esta diferencia podría explicarse por los requerimientos de energía eléctrica asociados a las operaciones que excluidas en el presente análisis (e.g. operaciones de transporte, generación de aire comprimido, etc.), así como una posible subestimación de los requerimientos de energía para la molienda. Para ilustrar este punto, considérese que el transporte neumático y mecánico y la generación de aire comprimido en conjunto absorben casi la mitad del uso total de energía en una planta de producción de harina de

trigo (Campbell y Mateos-Salvador, 2008). No obstante, el uso real de energía en las plantas de la HMN actualmente en operación muy probablemente difiere del estimado en los estudios de factibilidad citados, así que las comparaciones deben tomarse con precaución.

El secado es por mucho la operación más intensiva en la fabricación de HMN, resultado en buena medida del uso de aire caliente a alta temperatura y la remoción de una cantidad considerable de agua de las partículas de maíz molido. Ciertamente, el secado se identifica como una de las operaciones unitarias del procesamiento de alimentos más costosa y menos eficiente en términos energéticos (Marcotte y Grabowski, 2008).

Obsérvese que la mayoría de la energía asociada al secado se disipa en el aire húmedo caliente expulsado del ciclón separador, la cual es equivalente a aproximadamente 56% del total de energía usada en el proceso. Si bien en el presente análisis se supuso que el aire húmedo caliente del secado se libera a la atmósfera, esta corriente es una fuente potencial de calor de desecho recuperable que podría usarse para disminuir los requerimientos totales de energía térmica del proceso de producción. Por ejemplo, se ha propuesto aprovechar dicha corriente de aire caliente para precalentar el aire de combustión del secador y también para preparar el agua caliente para el lavado de los granos de maíz pre-cocidos, lo que implicaría ahorros de energía de 25% – 30% en el secado y 20% - 25% en el lavado y pre-cocimiento, respecto al proceso convencional (Rubio et al., 2003b). La demanda de energía para el secado también podría reducirse mediante una disminución del contenido de humedad de los granos de maíz molidos previo a su ingreso al secador, la adopción de un sistema de secado de varias etapas, y una mejor calibración de las condiciones de operación del secado (Marcotte y Grabowski, 2008).

De igual forma, los gases de combustión de la caldera y del calentador de aire constituyen otra fuente de calor de desecho potencialmente recuperable. La energía disipada estimada en dichos gases es equivalente a cerca de 11% de la energía total suministrada al proceso. El calor recuperado podría aprovecharse para precalentar el aire de combustión o el agua alimentados a la caldera (Reay, 2008), y de esta manera disminuir los requerimientos de energía para la generación de vapor. Por otra parte, el flujo de energía calculado para el licor de cocción y el agua residual de lavado es equivalente a casi 18% de la energía total utilizada. La vía inmediata para aprovechar esta energía térmica parecer ser el re-uso de dichos efluentes en las operaciones de pre-cocimiento y lavado. Además de reducir la demanda de vapor, esta medida podría ayudar a disminuir el consumo de agua y la descarga de aguas residuales, como se apuntó antes.

Dado que, según los resultados, la quema de gas natural es la fuente principal de emisiones de GEI, el secado es también el mayor generador de emisiones de GEI en la fabricación de HMN. De ahí que, las estrategias encaminadas a bajar los requerimientos de energía del secado podrían contribuir al mismo tiempo a mitigar las emisiones de GEI de la producción de HMN. Sustituir a los combustibles fósiles como fuentes de energía térmica para proceso podría también ayudar a atenuar los impactos ambientales de la producción industrial de HMN. En este sentido, un calentador eléctrico abastecido con electricidad generada con fuentes renovables de energía podría emplearse para generar la corriente de aire caliente para secado. Asimismo, podría recurrirse a la energía solar térmica para calentar el agua necesaria en las operaciones de pre-cocimiento y lavado. No obstante, múltiples factores técnicos y geográficos pueden obstaculizar la incorporación de fuentes renovables de energía en instalaciones industriales, tales como los patrones de demanda energética, los precios de la energía, y las condiciones climáticas (Moejes y van Boxtel, 2017).

Con respecto al uso de energía eléctrica, la utilización de motores más eficientes, especialmente en los molinos y los ventiladores de aire, podría ser una medida efectiva para disminuir la demanda de electricidad del proceso (Campbell y Mateos-Salvador, 2008). Los eventuales impactos de las estrategias de conservación de agua y energía sobre el desempeño global y la calidad del producto final deben ser considerados antes de implementar dichas estrategias, a fin de evitar efectos no deseados en el consumo de otros insumos y en las características de la HMN (Bühler et al., 2018; Marcotte y Grabowski, 2008; Navarri y Bédard, 2008).

El rendimiento estimado de HMN es comparable al reportado en otras fuentes (Rubio et al., 2011, 2003b; Rubio, 1985). En los estudios de factibilidad de las plantas de HMN antes citados se calculan rendimientos del orden de 93% - 97% (95% en promedio) con un contenido de humedad de la HMN de 11% - 12% (DISA, 1982, 1980; Estrada, 1956; Facio, 1991; Hernández et al., 1984). Las discrepancias podrían atribuirse a diferencias en las suposiciones sobre las pérdidas de maíz durante el procesamiento y el contenido final de humedad de la HMN. Nótese que el rendimiento de HMN influye marcadamente en el consumo de agua, uso de energía, y generación de emisiones de GEI por unidad de masa de HMN producida. Por lo tanto, elevar el rendimiento de HMN a través de, por ejemplo, adecuaciones en el proceso de producción o la adopción de tecnologías novedosas podría reducir sustantivamente el consumo de recursos naturales y los impactos ambientales de la fabricación de HMN.

VI.5 Limitaciones del estudio

Debido a la escasa disponibilidad de información técnica sobre el proceso de producción de HMN, las estimaciones del presente estudio se basan en un conjunto de suposiciones. Por ejemplo, únicamente se examinaron las principales operaciones unitarias de modo la mayoría de las operaciones auxiliares, tales como el transporte mecánico y neumático y la generación de aire comprimido, fueron excluidas. No obstante, en conjunto estas operaciones pueden representar una demanda de energía importante, en particular de energía eléctrica. Además, los requerimientos calculados para algunas de las operaciones más intensivas en energía, como la molienda y la circulación de aire, son estimaciones simples acompañadas de una incertidumbre elevada. La subestimación de la demanda de energía eléctrica es muy probable a la luz de la comparación con los valores reportados en otras de las fuentes consultadas. En consecuencia, las cifras estimadas, en especial las relativas al uso de energía y las emisiones de GEI, deben tomarse como aproximaciones preliminares susceptibles de ser perfeccionadas.

Los valores reportados de la mayoría de los parámetros de operación fluctúan en un rango amplio, de manera que los patrones de uso de agua y energía podrían variar notoriamente de una planta de producción a otra. Otras fuentes de variación, como las características de los equipos involucrados y el tamaño y la configuración de la planta de producción, también podrían afectar las estimaciones. Por ejemplo, las pérdidas de energía en los diferentes componentes considerados, en particular de aquellos que utilizan energía térmica, en general fueron ignoradas, aunque su magnitud puede ser importante (Marcotte y Grabowski, 2008). De ahí que, la eficiencia energética de los equipos y las pérdidas asociadas de energía deben ser tomadas en cuenta para mejorar las estimaciones. No obstante, para incorporar estas variables a los cálculos se necesita información técnica detallada que se antoja difícil de conseguir.

En el presente estudio se discutieron brevemente algunas opciones para reducir el consumo de agua, el uso de energía, y las emisiones de GEI de la producción de HMN. Sin embargo, la identificación y la cuantificación precisa de las oportunidades de ahorro demandan trabajo de investigación adicional. Un posible acercamiento a este aspecto consistiría en plantear distintos escenarios referentes a modificaciones en el proceso de producción o la sustitución de equipos, y evaluar sus efectos potenciales en el consumo de recursos naturales e impactos ambientales. De la misma manera, podría recurrirse a metodologías desarrolladas específicamente para develar oportunidades de mejora en instalaciones industriales.

En el caso del agua, varios algoritmos orientados a la minimización del uso del agua y la generación de aguas residuales en el sector industrial pueden ser aplicados a industrias del procesamiento de alimentos (Kim y Smith, 2008; Savulescu y Kim, 2008). De la misma manera, metodologías como la integración de procesos y el análisis exergetico pueden ser útiles para detectar con precisión oportunidades de ahorro de energía, tal como lo ejemplifican numerosos estudios dentro del sector de procesamiento industrial de alimentos (Bühler et al., 2018; Dowlati et al., 2017; Jokandan et al., 2015; Klemes y Perry, 2008; Waheed et al., 2008). No obstante, estas técnicas analíticas requieren información mucho más detallada, completa, y exacta de las corrientes de proceso, equipos involucrados, y condiciones de operación que es difícil de conseguir. Además, la evaluación de las distintas intervenciones debe ponderar asimismo su viabilidad técnica y económica. Estos aspectos bien podrían ser el objeto de estudio de trabajos posteriores.

VI.6 Conclusiones

Se estimaron el consumo de agua, el uso de energía, y las emisiones de GEI de la fabricación de harina de maíz nixtamalizado a partir de un modelo de proceso simplificado genérico e información disponible en fuentes bibliográficas. Por tonelada métrica de harina de maíz nixtamalizado elaborada, el consumo total de agua potable se estimó en casi 2.43 m³, el uso total de energía en aproximadamente 3.00 GJ (o bien, ca. 3.62 GJ si se incluye el uso de energía *agua arriba* en el procesamiento del gas natural y la generación de electricidad), y las emisiones totales de GEI en cerca de 199.60 kg CO₂e.

La operación unitaria más demandante de agua fue el lavado mecanizado de los granos de maíz precocidos. El secado fue la operación unitaria más intensiva en energía y en generación de emisiones de GEI, siendo responsable de más de la mitad de la energía total utilizada y las emisiones de GEI arrojadas a la atmósfera. Las estrategias orientadas a minimizar el consumo de agua, el uso de energía, y la generación de emisiones de GEI en la fabricación industrial de harina de maíz nixtamalizado deberían enfocarse preferentemente en las operaciones unitarias de lavado y secado. Asimismo, la amplia variación de la mayoría de los principales parámetros de operación sugiere la existencia de oportunidades de mejora del proceso en términos de consumo de recursos naturales e impactos ambientales asociados.

A fin de identificar y cuantificar las oportunidades de ahorro es necesario llevar a cabo trabajo adicional que incluya, entre otras cosas, la recopilación de información más completa, detallada, y exacta que permita la aplicación de las metodologías apropiadas. Alternativamente, podrían definirse y evaluarse distintos escenarios de reducción de agua, energía, y emisiones de GEI basados en modificaciones en el proceso de producción o en los equipos y maquinaria involucrados.

El presente trabajo constituye una aproximación preliminar a los patrones de consumo de agua, uso de energía, y emisiones de GEI en la producción industrial de harina de maíz nixtamalizado. Por ello, las estimaciones aquí reportadas deben ser tomadas con cautela hasta en tanto se corroboren con datos reales de plantas en operación. Los resultados del presente estudio son útiles como punto de partida para realizar análisis más minuciosos sobre la demanda de recursos naturales y las cargas ambientales de uno de los principales alimentos derivados del maíz.

VI.7 Referencias

- Ambriz, J.J., Paredes, H.R., 2009. Uso de la energía en molinos de nixtamal y tortillerías, en: de Teresa, A.P., Viniegra, G. (Eds.), *Temas Selectos de La Cadena Maíz-Tortilla. Un Enfoque Multidisciplinario*. Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa, México D.F., pp. 203–231.
- Appel, W.B., 1987. Comparison of hammermill and roller mill grinding of grain sorghum and corn. Tesis de Maestría. Kansas State University. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/33362049.pdf> [Consultado el: 18/08/2018].
- Bühler, F., Nguyen, T.- V., Jensen, J.K., Holm, F.M., Elmegaard, B., 2018. Energy, exergy and advanced exergy analysis of a milk processing factory. *Energy* 162, 576–592.
- Campbell, G., Mateos-Salvador, F., 2008. Water and energy management in cereals processing, en: Klemes, J., Smith, R., Kim, J.- K. (Eds.), *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*. Woodhead Publishing Ltd. - CRC Press, Cornwall, England, pp. 842–862.
- Chase, M.W.J., 1998. NIST - JANAF Thermochemical Tables. *J. Phys. Chem. Ref. Data Monograph*, 1–1951.
- Continental, 1986. Screw conveyor catalogue and engineering manual. Continental Conveyor & Machine Works LTD. Quebec, CAN. Disponible en: http://www.continentalconveyor.ca/images/product_pdf/Screw_Conveyor_Catalogue.pdf [Consultado el: 05/08/2018].
- Díez de Sollano, C.S.F., Berriozabal, J.M., 1955. Method of producing corn tortilla flour. U.S. Pat. No. US2704257.
- DISA, 1982. Estudio de factibilidad para la instalación de una planta productora de harina de maíz en el estado de México. Disa Desarrollo Integral, S.A. México, D.F.
- DISA, 1980. Estudio de factibilidad para la instalación de una planta productora de harina de maíz en el municipio de Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. Disa Desarrollo Integral, S.A. México, D.F.
- Domínguez-Espinosa, R., Pacho-Carrillo, D., 2003. Efluentes de la industrialización del maíz: ¿contaminante o recurso valioso? *Rev. la Autónoma Yucatán* 227, 54–63.
- Dowlati, M., Aghbashlo, M., Soufiyan, M.M., 2017. Exergetic performance analysis of an ice-cream manufacturing plant: A comprehensive survey. *Energy* 123, 445–459.
- Durán-Domínguez, M.C., 1996. La contaminación en la industria de la masa y la tortilla, en: Torres, F. (Ed.), *La Industria de La Masa y La Tortilla. Desarrollo y Tecnología*. Programa Universitario de Alimentos, UNAM, México D.F., pp. 173–193.
- Earle, R.L., 1983. *Unit operations in food processing*. Pergamon Press, Oxford, UK.
- Eckhoff, S., Cuevas, E.O., Milan, J., 2006. Nixtamalization process and products produced therefrom. US Pat. No. US2006/0193964A1.
- Elkin, D., Stevens, C., 2008. Environmental and consumer issues regarding water and energy management in food processing, en: Klemes, J., Smith, R., Kim, J.- K. (Eds.), *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*. Woodhead Publishing Ltd. - CRC Press, Cornwall, England, pp. 29–44.
- Engineering Toolbox, 2003. Exhaust and outlet temperatures for some common fuels [online] [WWW Documento]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-exhaust-temperatures-d_168.html [Consultado el 28/09/18].
- Estrada, J.L., 1956. Obtención industrial de harina de maíz y proyecto de una fábrica de 50 toneladas diarias de capacidad. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Evans, J., 2008. Minimising energy consumption associated with chilling, refrigerated storage and cooling systems in the food industry, en: Klemes, J., Smith, R., Kim, J.- K. (Eds.), *Handbook of Water and Energy*

- Management in Food Processing. Woodhead Publishing Ltd. - CRC Press, Cornwall, England, pp. 449–480.
- Facio, M.F., 1991. Proyecto de Factibilidad de una planta procesadora de harina de maíz nixtamalizado en el municipio de Celaya Guanajuato. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Featherstone, S., 2015. A complete course in canning and related processes. Vol. 1: Fundamental information on Canning, 14th ed. Woodhead Publishing, U.K.
- Fellows, P.J., 2017. Food processing technology. Principles and practices, 4th ed. Woodhead Publishing, Duxford, UK.
- Figuroa-Cárdenas, J.D., Véles-Medina, J.J., Esquivel-Martínez, A.M., Mariscal-Moreno, R.M., Santiago-Ramos, D., Hernández-Estrada, Z.J., 2016. Effect of processing procedure on the formation of resistant starch in tamales. *Starch* 68, 1121–1128.
- FIRA, 2014. Análisis sectorial de la red maíz. Dirección de Investigación Económica y Sectorial. Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura. México, D.F.
- Freudenrich, A.L., Moore, W.A., Sardeshpande, I.M., 2005. Nixtamalization process. US Pat. No. US6872417B1.
- Garnett, T., 2011. Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy* 36, S23–S32.
- Ghasem, N., Henda, R., 2015. Principles of chemical engineering processes. Material and energy balances, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- González-Arguinzones, U., 2014. El maíz y los productos de su industrialización. Trillas, México D.F.
- GREET, 2015. The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model - GREET Model. Argonne National Laboratory. US Department of Energy, Argonne, IL.
- GRUMA, 2015. Reporte Anual. GRUMA S.A.B. de C.V. San Pedro Garza García, N.L., México. Disponible en: https://www.gruma.com/media/611051/reporte_anual_gruma_2014_versi_n_final_con_anexos.pdf [Consultado el: 06/07/2016].
- Gwirtz, J.A., Garcia-Casal, M.N., 2014. Processing maize flour and corn meal food products. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1312, 66–75.
- Hernández, A.J., Márquez, F., Miranda, F., Aguilar, G., Jiménez, J., 1984. Estudio de factibilidad de una planta de harina de maíz. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- IDTA, 1984. Estudio de factibilidad técnica, económica y financiera para la instalación de una planta productora de harina de maíz nixtamalizado en el estado de Hidalgo. Ingeniería y Desarrollo de Tecnología Alimentaria, S.A. México D.F.
- IPCC, 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group I: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK - New York, USA.
- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, Japan.
- Jokandan, M.J., Aghbashlo, M., Mohtasebi, S.S., 2015. Comprehensive exergy analysis of an industrial-scale yogurt production plant. *Energy* 93, 1832–1851.
- Juárez-Hernández, S., Sheinbaum, C., 2018. Irrigation energy use and related greenhouse gas emissions of maize production in Mexico. *Int. J. Water Resour. Dev.* doi:<https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1482739>
- Kim, J.-K., Smith, R., 2008. Methods to minimise water use in food processing, en: Klemes, J., Smith, R., Kim, J.-K. (Eds.), *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*. Woodhead Publishing Ltd. - CRC Press, Cornwall, England, pp. 113–135.
- Klemes, J., Perry, S., 2008. Methods to minimise energy use in food processing, en: Klemes, J., Smith, R., Kim, J.-K. (Eds.), *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*. Woodhead Publishing Ltd. - CRC Press, Cornwall, England, pp. 136–199.
- Lee, W.H., Okos, M.R., 2011. Sustainable food processing systems - Path to a zero discharge: Reduction of water, waste and energy. *Procedia Food Sci.* 1, 1768–1777.
- Marcotte, M., Grabowski, S., 2008. Minimising energy consumption associated with drying, baking and evaporation, en: Klemes, J., Smith, R., Kim, J.-K. (Eds.), *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*. Woodhead Publishing Ltd. - CRC Press, Cornwall, England, pp. 481–522.
- Martínez-Bustos, F., Martínez-Montes, J.D.L., Sánchez-Sinencio, F., Ruiz-Torres, M., 2002. High pressure

- process and system for the production of fresh whole corn masa, nixtamalized whole corn flour, and derived products. US Pat. No. US6387437B1.
- Martinez-Bustos, F., Sanchez-Sinencio, F., Gonzalez-Hernandez, J., Martinez, J.D.L.L., Ruiz-Torres, M., 1996. Method for the preparation of instant fresh corn dough or masa. U.S. Pat. No. US5532013.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P., 1993. Unit operations of chemical engineering, 5th ed. McGraw-Hill, Singapore.
- McDonough, C.M., Gomez, M.H., Rooney, L.W., Serna-Saldivar, S.O., 2001. Alkaline-cooked corn products, en: Lusas, E.W., Rooney, L.W. (Eds.), *Snack Foods Processing*. Technomic Publishing Co., PA, USA, pp. 73–113.
- Mehta, S., 2001. Tortilla chip processing, en: Lusas, E.W., Rooney, L.W. (Eds.), *Snack Foods Processing*. Technomic Publishing Co., PA, USA, pp. 261–280.
- MINSA, 2015. Reporte Anual. Grupo MINSA, S.A.B. de C.V. Tlalnepantla, Edo. Mex., México. Disponible en: http://www.bmv.com.mx/docs-pub/infoanua/infoanua_604917_2014_1.pdf [Consultado el: 06/07/2016].
- Moejes, S.N., van Boxtel, A.J.B., 2017. Energy saving potential of emerging technologies in milk powder production. *Trends Food Sci. Technol.* 60, 31–42.
- Navarri, P., Bédard, S., 2008. Auditing energy and water use in the food industry, en: Klemes, J., Smith, R., Kim, J.-K. (Eds.), *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*. Woodhead Publishing Ltd. - CRC Press, Cornwall, England, pp. 85–112.
- Nisshin Engineering, n.d. Air classifier - Turbo classifier. Nisshin Engineering Inc. Tokio, JAP. Disponible en: <http://www.nisshineng.com/eng/products/pdf/E6.pdf> [Consultado el: 25/10/2018].
- Oloman, C., 2009. Material and energy balances for engineers and environmentalists. Imperial College Press, London.
- Palamatic, n.d. Sifting and security equipment. Palamatic Process Machines Engineering. Brécé, France. Disponible en: <https://www.malayandaching.com/pdf/product-catalogue/Sifting-&Security.pdf> [Consultado el: 25/10/2018].
- Park, S.H., Lamsal, B.P., Balasubramaniam, V.M., 2014. Principles of food processing, en: Clark, S., Jung, S., Lamsal, B. (Eds.), *Food Processing: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, Oxford, UK, p. 1-.
- PEMEX, 2000. Gas Natural. Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas. Pemex Gas y Petroquímica Básica. Disponible en: http://www.gas.pemex.com.mx/NR/ronlyres/1D3E1128-E8A5-4CD1-B04C-DBC7CEFC0592/0/msdsgasnatural_02.pdf [Consultado el: 14/06/2018].
- Ramírez, G., Viniegra, G., Orozco, C., Rico, L., 2009. El nejayote, su tratamiento y uso, en: de Teresa, A., Viniegra, G. (Eds.), *Temas Selectos de La Cadena Maíz-Tortilla. Un Enfoque Multidisciplinario*. Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa, México D.F., pp. 233–256.
- Reay, D., 2008. Heat recovery in the food industry, en: Klemes, J., Smith, R., Kim, J.-K. (Eds.), *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*. Woodhead Publishing Ltd. - CRC Press, Cornwall, England, pp. 544–569.
- Rivero-Jimenez, C., Quintanar-Guzman, A., 2006. Instant masa. US Pat. No. US2006/0177557A1.
- Rodriguez-Gonzalez, O., Buckow, R., Koutchma, T., Balasubramaniam, V.M., 2015. Energy requirements for alternative food processing technologies - Principles, assumptions, and evaluation of efficiency. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 14, 536–554.
- Rooney, L.W., Serna-Saldivar, S.O., 2003a. Food use of whole corn and dry-milled fractions, en: White, P.J., Johnson, L.A. (Eds.), *Corn: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, pp. 495–535.
- Rooney, L.W., Serna-Saldivar, S.O., 2003b. Food use of whole corn and dry-milled fractions, en: White, P.J., Johnson, L.A. (Eds.), *Corn: Chemistry and Technology*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, pp. 495–535.
- Rubio, F.A., Rubio, M.J., Contreras, R., Ramirez, J.F., Massu, R.L., 2006. Continuous production of an instant corn flour for snack and tortilla, using a neutral enzymatic precooking. US Pat. No. US2006/0024407A1.
- Rubio, F.A., Rubio, M.J., Contreras, R., Sosa, F., Sánchez, F.J., Ramírez, F.J., 2011. Method for the production of whole nixtamalized corn flour. Pat. No. EP2343992B1.
- Rubio, M.J., 1985. Continuous production of corn products. U.S. Pat. No. US4513018.
- Rubio, M.J., 1982. Continuous production of grain products. U.S. Pat. No. US4326455.

- Rubio, M.J., Contreras, R., Arroyo, F., 2001. Continuous production of an instant corn flour for arepa and tortilla, using acid-cooking. U.S. Pat. No. US6322836B1.
- Rubio, M.J., Contreras, R., Rubio, F., 2003a. Continuous production of an instant corn flour for arepa and tortilla, using and enzymatic precooking. US Pat. No. US6638554B1.
- Rubio, M.J., Contreras, R., Sosa, F., 2003b. Nixtamalized corn flour process and apparatus improvement for recovering heat and reducing particulate emission from waste hot air. U.S. Pat. No. US2003/0143308A1.
- Rubio, M.J., Contreras, R., Sosa, F., 2002. Method for the production of pressure precooked and dehulled corn flour for tortilla. U.S. Pat. No. US6344228B1.
- Sahai, D., Surjewan, I., Mua, J.P., Buendia, M.O., Rowe, M., Jackson, D.S., 2000. Dry matter loss during nixtamalization of a white corn hybrid: Impact of processing parameters. *Cereal Chem.* 77, 254–258.
- Sangamithra, W.W., 2016. Moisture dependent physical properties of maize kernels. *Int. Food Res. J.* 23, 109–115.
- Saravacos, G., Kostaropoulos, A.E., 2016. Handbook of food processing equipment, 2nd ed. Springer, Switzerland.
- Savulescu, L., Kim, J.-. K., 2008. Novel methods for combined energy and water minimisation in the food industry, en: Klemes, J., Smith, R., Kim, J.-. K. (Eds.), Handbook of Water and Energy Management in Food Processing. Woodhead Publishing Ltd. - CRC Press, Cornwall, England, pp. 304–331.
- Serna-Saldivar, S.O., Gomez, M.H., Rooney, L.W., 1990. Technology, chemistry, and nutritional value of alkaline-cooked corn products, en: Pomeranz, Y. (Ed.), Advances of Cereal Science and Technology. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN, pp. 243–307.
- Serna-Saldivar, S.O., Hilda, M.H., Rooney, L.W., 2001. Food uses of regular and specialty corns and their dry-milled fractions, en: Hallauer, A.R. (Ed.), Specialty Corns. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 303–336.
- Serna-Saldivar, S.O., Rooney, L.W., 2015. Industrial production of maize tortillas and snacks, en: Rooney, L.W., Serna-Saldivar, S.O. (Eds.), Tortillas. Wheat Flour and Corn Products. AACC International Press, St. Paul, MN, pp. 240–275.
- SIAP, 2017a. Sistema de información agroalimentaria de consulta (SIACON) 1980-2014. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, Ciudad de México.
- SIAP, 2017b. Balanza disponibilidad-consumo de maíz grano. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, Ciudad de México.
- Singh, R.P., Heldman, D.R., 2014. Introduction to food engineering, Fifth edit. ed. Academic Press, San Diego, CA.
- Sunderland, R.D., 1996. Continuous method of producing masa flour. U.S. Pat. No. US5558898.
- Torres, F., 1994. La agroindustria del maíz en México. El espacio y el dilema entre tradición y modernismo: El caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Probl. Desarro.* 25, 203–233.
- Vaqueiro, M.C., Reyes, P., 1986. Process for producing nixtamalized corn flour. US Pat. No. 4594260.
- Vidal-Amaro, J.J., 2012. Sustitución de gas L.P. por energía solar en el proceso de cocción de maíz. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Waheed, M.A., Jekayinfa, S.O., Ojedian, J.O., Imeokparia, O.E., 2008. Energetic analysis of fruit juice processing operations in Nigeria. *Energy* 33, 35–45.
- Watson, S.A., 2003. Description, development, structure, and composition of the corn kernel, en: White, P.J., Johnson, L.A. (Eds.), Corn: Chemistry and Technology. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, pp. 69–106.
- Zisopoulos, F.Z., Rossier-Miranda, F.J., Der Goot, A.J.V., Boom, R.M., 2017. The use of exergetic indicators in the food industry - A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 57, 197–211.

[Esta página se dejó en blanco intencionalmente]

CAPÍTULO VII

Conclusiones generales

El análisis exploratorio de la agroindustria del maíz reveló que ésta es un sistema complejo que requiere distintos tipos y cantidades de recursos naturales durante la producción, el transporte, el almacenamiento, la conservación, y el procesamiento del maíz. Los insumos derivados de recursos energéticos fósiles son la fuente de energía dominantes en toda la cadena de valor de esta agroindustria. La dependencia de los combustibles fósiles afecta negativamente el desempeño ambiental de la agroindustria del maíz blanco, pues conduce a la emisión de cantidades considerables de gases de efecto invernadero.

En relación a la producción de maíz bajo riego, la mayor parte del uso de energía para riego y las emisiones asociadas de gases de efecto invernadero se asocia a la extracción de agua de pozo profundo pues todos los sistemas de producción de maíz bajo riego examinados dependen en mayor o medida de esta fuente de agua para riego. La mayor parte de la demanda de agua de riego se debe a los sistemas de producción de maíz con riego por gravedad debido en buena medida a pobres eficiencias de conducción, distribución y aplicación del agua de riego. La extracción de agua de pozo profundo es la principal responsable del uso de energía para riego y las emisiones asociadas de gases de efecto invernadero. Por ello, las intervenciones de política pública deberían poner especial atención en promover el uso sustentable de los acuíferos mediante, por ejemplo, la revisión de los subsidios a las tarifas eléctricas para riego, el control de las extracciones, y la asignación de un precio adecuado al agua para riego.

En cuanto al uso de energía, consumo de exergía, y emisiones de gases de efecto invernadero de sistemas de producción de maíz representativos del país, las cifras varían notoriamente debido, en parte, a la diversidad de factores agro-climáticos y socio-económicos que influyen en el cultivo del maíz, y que se reflejan en una multiplicidad de prácticas agrícolas y rendimientos de producción. El uso de diésel, la fabricación y aplicación de fertilizantes sintéticos, y la generación de electricidad para el suministro de riego contribuyen en mayor medida al uso de energía, el consumo de exergía, y las emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas de producción de maíz estudiados. Los sistemas de producción de temporal con bajo uso de insumos agrícolas modernos registran las menores demandas de recursos e impactos ambientales por unidad de superficie, aunque en general exhiben pobres rendimientos de producción. Los sistemas de producción intensivos en insumos agrícolas reportan los mayores niveles de uso de energía, consumo de exergía, y emisiones de gases de efecto invernadero por hectárea sembrada; sin embargo, sus elevados rendimientos de producción les permiten disminuir el consumo de recursos e impactos ambientales por unidad de grano producido. Reducir el uso diésel en las labores agrícolas, elevar la eficiencia en el uso de fertilizantes sintéticos y del agua de riego, y utilizar fuentes renovables de energía podrían ayudar a hacer más sustentables los sistemas de producción de maíz.

Respecto a las posibilidades de reducción de consumo de agua, uso de energía, y generación de emisiones de gases de efecto invernadero en el cultivo de maíz grano, la sustitución parcial del fertilizante N sintético con estiércol o con abono verde, así como con la mejora de la eficiencia del uso del fertilizante N sintético resultaron en las mayores reducciones potenciales en el uso de

energía. La mejora de la eficiencia del uso del fertilizante N sintético también produjo las mayores reducciones potenciales en las emisiones totales de gases de efecto invernadero. La conversión a sistemas de riego presurizado y la introducción de métodos de labranza de conservación proporcionaron las mayores reducciones potenciales en la demanda de agua de riego. Dado que parece más fácil de implementar en el corto plazo, la mejora en el manejo del fertilizante N sintético y del agua de riego podría ser la opción más apropiada para abatir el consumo de agua, el uso de energía, y las emisiones de gases de efecto invernadero de los sistemas de producción de maíz en México.

Por lo que toca a la industria de la harina de maíz nixtamalizado, el lavado de los granos de maíz pre-cocidos parece ser la operación más intensiva en uso de agua mientras que el secado de las partículas molidas de maíz se identificó como la operación más intensiva en energía y generación de emisiones de gases de efecto invernadero. Las intervenciones para minimizar el consumo de agua, el uso de energía, y la generación de emisiones de gases de efecto invernadero en la fabricación de harina de maíz nixtamalizado deberían entonces poner especial atención en dichas operaciones. Para detectar y cuantificar las oportunidades de reducción de agua, energía, y emisiones de gases de efecto invernadero se requiere trabajo adicional a fin de acopiar la información necesaria para la aplicación de las metodologías pertinentes. Los resultados de este análisis son una aproximación preliminar a los patrones de uso de recursos e impactos ambientales de la producción industrial de harina de maíz nixtamalizado por lo cual son susceptibles de mejora. Trabajos posteriores también deberían examinar otras industrias relevantes en la agroindustria del maíz, como la de alimentos balanceados para animales y del almidón de maíz y sus derivados.

Las estimaciones derivadas del presente trabajo se sustentan fundamentalmente en información y datos disponibles en fuentes bibliográficas. Por ello, los resultados deben ser ponderados con cautela. Es necesario contrastarlos con mediciones directas bajo condiciones reales en los campos de cultivo de maíz y las plantas productoras de harina de maíz nixtamalizado para así determinar su confiabilidad. Las metodologías utilizadas también podrían perfeccionarse a fin de refinar las estimaciones.

El presente trabajo aporta información útil para llevar a cabo investigaciones más profundas sobre los patrones de consumo de recursos naturales e impactos ambientales del sistema agroindustrial del maíz en México. Los resultados de esta investigación asimismo podrían orientar en la elaboración de políticas públicas que contribuyan a la conservación del agua y la energía, así como a la minimización de los impactos ambientales de la agroindustria del maíz en México, en particular del cultivo y procesamiento industrial de este cereal.