



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“ESTRATEGIAS DE GESTIÓN ÓPTIMA PARA
MAXIMIZAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-
AGUA-ALIMENTOS”**

TESIS presentada por:
M.C. Brenda Cansino Loeza

A la División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería Química como
requisito parcial para obtener el
grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

Director de Tesis:
Dr. José María Ponce Ortega

Morelia, Michoacán

Febrero del 2023

RESUMEN

“ESTRATEGIAS DE GESTIÓN ÓPTIMA PARA MAXIMIZAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ALIMENTOS”

Por

M.C. Brenda Cansino Loeza

Febrero del 2023

Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por Dr. José María Ponce Ortega

La seguridad del nexo energía-agua-alimentos se ha convertido en una preocupación mundial, amenazada por la rápida urbanización, el consumo insostenible de recursos, el crecimiento demográfico y el cambio climático, los cuales han ejercido presión sobre los recursos para satisfacer las demandas socioeconómicas. El nexo energía-agua -alimentos es fundamental para el desarrollo sostenible. Sin embargo, para lograr la gestión eficiente de los recursos es importante el estudio de las vulnerabilidades a las que se encuentra expuesta la seguridad del nexo, ya sea por factores sociales o ambientales, como lo son los impactos asociados al cambio climático. El diseño eficiente y sostenible que permita la seguridad del agua, energía y alimentos requiere la participación de múltiples partes interesadas en el proceso de toma de decisiones. Por ello, el presente proyecto de investigación tiene como finalidad desarrollar modelos de optimización para el diseño y planificación de sistemas de integración en áreas con baja disponibilidad de recursos. Como caso de estudio se seleccionaron dos regiones de México, las cuales presentan escases de recursos y afrontan la creciente demanda de los mismos. Estos modelos puede ser la base para planificar sistemas integrados que incrementen la seguridad del nexo energía-agua-alimentos involucrando a diferentes partes interesadas, lo cual permitirá determinar interacciones sostenibles entre recursos.

Palabras clave: Optimización; Sustentabilidad; Agua; Energía; Alimentos; Gestión de recursos.

ABSTRACT

“STRATEGIES FOR THE OPTIMAL MANAGEMENT TO MAXIMIZE THE SECURITY OF THE WATER-ENERGY-FOOD NEXUS”

By

Brenda Cansino Loeza

February 2023

Ph.D. in Chemical Engineering Sciences

Supervised by Dr. José María Ponce Ortega

The security of the energy-water-food nexus has become a global concern, threatened by rapid urbanization, unsustainable resource consumption, population growth and climate change, all of which have put pressure on resources to meet socioeconomic demands. The water-energy-food nexus is essential for sustainable development. However, to achieve efficient resource management, it is important to study the vulnerabilities to which the security of the nexus is exposed, whether due to social or environmental factors, such as the impacts associated with climate change. Efficient and sustainable design that enables water, energy and food security requires the participation of multiple stakeholders in the decision-making process. Therefore, this research project aims to develop optimization models for the design and planning of integration systems in areas with low availability of resources. As a case study, two regions of Mexico were selected, which have scarce resources and face the growing demand for them. This model can be the basis for developing integrated systems that increase the security of the energy-water-food nexus involving different stakeholders, which will determine sustainable interactions between resources.

Keywords: Optimization; Sustainability; Water; Energy; Food; Resource management.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
Capítulo 1. Generalidades	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
Capítulo 2. Marco Teórico.....	4
2.1 Energía, agua y alimentos.....	4
2.1.1 Nexo agua-energía.....	6
2.1.2 Nexo agua-alimentos	8
2.1.3. Nexo energía-alimentos.....	9
2.1.4. Nexo energía-agua-alimentos	11
2.2. Optimización	13
Capítulo 3. Un enfoque sistemático para evaluar la seguridad del nexo energía-agua-energía- alimentos.....	16
3.1 Introducción.....	16
3.2 Metodología.....	18
3.2.1 Planteamiento del problema	18
3.2.2 Caso de estudio.....	19
3.3 Evaluación de la seguridad del Nexo agua-energía-alimentos.....	27
3.3.1 Progreso en la seguridad del nexo agua-energía-alimentos.....	28
3.4 Conclusiones.....	33
Capítulo 4. Evaluación del nexo agua-energía-alimentos a través de un enfoque de optimización de múltiples partes interesadas	35
4.1 Introducción.....	35
4.2 Metodología.....	36

4.2.1 Planteamiento del problema	36
4.2.2 Modelo matemático	37
4.2.3 Caso de estudio	55
4.3 Discusión de resultados	57
4.4 Conclusiones	72
Capítulo 5. Un marco de nexos agua-energía-alimentos basado en la asignación óptima de recursos	74
5.1 Introducción	74
5.2 Metodología	75
5.2.1 Planteamiento del Problema	75
5.2.2 Modelo de optimización	77
5.2.3 Caso de estudio	110
5.3 Discusión de Resultados	112
5.4 Conclusiones	124
Conclusiones generales	126
Apéndice A. Material suplementario	127
Apéndice B. Nomenclatura	133
Publicaciones	141
Referencias	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1	Suministro mundial total de energía por fuente (IEA, 2021).....	5
Figura 2. 2	Interdependencias entre el nexo agua-energía.	6
Figura 2. 3	Interacción entre el agua y los alimentos.	9
Figura 2. 4	Nexo energía energía-alimentos.....	10
Figura 2. 5	Vías de conversión de biomasa.	11
Figura 2. 6	Interacciones en el nexo energía-agua-alimentos.	12
Figura 3. 1	Cuencas hidrológicas en el estado de Sonora.	20
Figura 3. 2	Porcentaje de distribución de agua en el estado de Sonora, México.	22
Figura 3. 3	Porcentaje de consumo de energía por sector en Sonora.	23
Figura 3. 4	Producción de energía primaria en Sonora.	24
Figura 3. 5	Evaluación del índice de seguridad hídrica-energética-alimentaria para 2013, 2015, 2019, 2025 y 2030.	28
Figura 3. 6	Evaluación del índice de seguridad para el año 2019.	30
Figura 3. 7	Evaluación de los índices de seguridad del nexo WEF durante 17 años.	32
Figura 4. 1	Superestructura propuesta para la integración de recursos a nivel macroscópico.	37
Figura 4. 2	Comarca Lagunera.	56
Figura 4. 3.	Resultados obtenidos de los escenarios evaluados.	57
Figura 4. 4	Diagrama de flujo del escenario correspondiente a la minimización de los costos.	63
Figura 4. 5	Diagrama de flujo del escenario correspondiente a la minimización del consumo de agua.....	64
Figura 4. 6.	Diagrama de flujo del escenario correspondiente a la minimización de las emisiones.	66
Figura 4. 7	Representación gráfica de las soluciones obtenidas usando el método Multistakeholder.	70
Figura 5. 1	Superestructura general.	77
Figura 5. 2	Superestructura del sector agua.....	78
Figura 5. 3	Superestructura del sector energético.	79
Figura 5. 4	Superestructura del sector alimentario.....	80
Figura 5. 5	Representación del caso de estudio.....	111
Figura 5. 6	Diagrama de flujo del esquema de bienestar social.	116
Figura 5. 7	Diagrama de flujo del esquema Rawlsian.....	120
Figura 5. 8	Diagrama de flujo del esquema Rawlsian-Nash.	121
Figura 5. 9	Diagrama de flujo del esquema Nash.	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Índices para medir la sustentabilidad o seguridad del Nexo WEF.	18
Tabla 3. 2 Características de las principales cuencas hidrológicas del estado de Sonora (CONAGUA, 2018a).....	21
Tabla 3. 3 Principales características de las presas ubicadas en el caso de estudio (SINA, 2020).....	21
Tabla 3. 4 Centrales eléctricas en Sonora (CFE, 2020).....	23
Tabla 3. 5 Principales características de los distritos de riego en la región (CONAGUA, 2020b).....	25
Tabla 3. 6 Tasa de crecimiento porcentual de 2015 a 2030.....	31
Tabla 4. 1 Generación de emisiones en las tecnologías de conversión de residuos a energía.	58
Tabla 4. 2 Costos del sistema en los diferentes escenarios.....	59
Tabla 4. 3 Requerimientos de energía y agua en diferentes sectores.	60
Tabla 4. 4 Producción de cultivos en los escenarios evaluados.	60
Tabla 4. 5 Productos del sector ganadero para los escenarios evaluados.....	61
Tabla 4. 6 Extracción de agua de pozos hacia los diferentes sectores.....	62
Tabla 4. 7. Distribución de los residuos sólidos municipales a las tecnologías de conversión a energía.....	66
Tabla 4. 8 Soluciones generadas usando el método Multistakeholder.	69
Tabla 5. 1 Información nutricional de diferentes tipos de alimentos (Health Secretary, 2010).	80
Tabla 5. 2 Índices actuales de seguridad del nexo agua-energía-alimentos.	111
Tabla 5. 3 Aspectos económicos y ambientales de los esquemas de asignación.	113
Tabla 5. 4 Índice de seguridad WEF para los esquemas analizados.	114
Tabla 5. 5 Emisiones generadas en los esquemas abordados.	116
Tabla 5. 6 Capacidad de los procesos instalados en los diferentes esquemas.	117
Tabla 5. 7 Toneladas de alimentos demandadas para cubrir los requerimientos nutricionales de la población en los esquemas de asignación.....	119
Tabla 5. 8 Índice de seguridad WEF por región para los diferentes esquemas analizados.	124

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

El Nexo energía-agua -alimentos (WEF) se ha convertido en un tema destacado en la última década y ha sido reconocido en diferentes áreas de investigación ya que es una herramienta para lograr el desarrollo sostenible. El concepto ganó interés en la comunidad científica destacando la importancia de explorar las interacciones y sinergias entre los recursos para lograr la sostenibilidad (Hoff, 2011). Las interdependencias del WEF se han discutido en muchos trabajos. El agua es esencial para la producción de energía y la extracción y procesamiento de combustibles; de manera contraria, se necesita energía para la distribución y el tratamiento del agua. Por otra parte, se requiere energía para el almacenamiento y procesamiento de alimentos. Además, los cultivos alimentarios podrían utilizarse para generar energía en forma de biocombustibles. Por lo tanto, una perturbación que limite la disponibilidad de uno de los recursos provocará un desequilibrio en la seguridad de los demás (Ringler et al., 2016; Zhang y Vesselinov, 2017). El agua, la energía y los alimentos son cruciales para abordar los desafíos globales, mejorar las interacciones entre los procesos antropogénicos y el medio ambiente, para el bienestar de la población y para proporcionar recursos asequibles (FAO, 2014). Sin embargo, la continua presión sobre estos recursos es una de las razones para esperar su escasez en los próximos años. La seguridad del nexo WEF es un desafío creciente impulsado principalmente por la demanda cambiante de los patrones de consumo de recursos, la rápida urbanización, el crecimiento de la población, los sistemas de producción ineficientes y el cambio climático (Terrapon-Pfaff et al., 2018; Zhang et al., 2018). Proyecciones para el año 2030 indican que se espera una escasez del 40% en la demanda de agua, 50% de energía y 50% de alimentos (Nexus Regional Dialogue Programme, 2018). Por lo tanto, la evaluación del nexo WEF es crucial, ya que la interacción entre estos sectores hace más desafiante enfrentar la creciente demanda y, en consecuencia, esto podría conducir a una mayor escasez de recursos.

Así mismo, el nexo WEF se ha convertido en un tema fundamental para lograr los objetivos de la Agenda para el Desarrollo Sostenible, los cuales apuntan a promover el crecimiento económico sostenible, asegurar el acceso a energía asequible y confiable, garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua, lograr la seguridad alimentaria, mejorar la nutrición y tomar acciones para combatir el cambio climático y sus impactos

(Naciones Unidas, 2015). Sin embargo, para cumplir con los objetivos establecidos en la Agenda, es necesario invertir en infraestructura e iniciar nuevos procesos productivos que generen crecimiento económico y, al mismo tiempo, no comprometan los recursos para el futuro, lo cual es un desafío complicado que requiere esfuerzos multidisciplinarios. Ante este contexto, el diseño eficiente y sostenible del nexo WEF requiere herramientas de toma de decisiones para abordar los desafíos globales, así como políticas para la transición a una economía circular (Del Borghi et al., 2020; Slorach et al., 2020). La optimización es una herramienta potencial y comúnmente utilizada para la toma de decisiones que permite determinar el diseño y las condiciones óptimas de un sistema donde se contemplan diversas opciones para la integración de recursos y brinda información valiosa antes de la implementación real sobre la ubicación y capacidad del sistema (Feng et al., 2020). La toma de decisiones debe considerar objetivos económicos, ambientales y sociales de manera conjunta, así como de las partes involucradas con el nexo para en la implementación del sistema, como lo son el gobierno, agencias reguladoras, la sociedad civil y el sector privado que están orientados por diversos intereses. Además, se deben involucrar estrategias que permitan maximizar la seguridad del nexo WEF y evaluar su progreso para hacer proyecciones futuras y buscar soluciones que resulten en sistemas resilientes. En este contexto, el nexo WEF ha sido abordado utilizando herramientas de optimización y se han propuesto diversas alternativas, como la incorporación de sistemas de aprovechamiento de agua reciclada para disminuir la escasez de agua (Hussien et al., 2017), la diversificación de los sistemas eléctricos para reducir la vulnerabilidad energética (Bieber et al., 2018) y el desarrollo de estrategias de políticas públicas (Kaddoura y El Khatib, 2017; Mercure et al., 2019). En los últimos años, se ha prestado especial atención a la evaluación cuantitativa de los sistemas de nexo agua-energía-alimentos y se han desarrollado diferentes indicadores y métricas para medir el progreso en los sectores de agua, energía y alimentos (Mannan, 2018). Se han hecho grandes esfuerzos para modelar, cuantificar y optimizar las interconexiones entre los recursos. Sin embargo, la cuantificación de las interrelaciones multisectoriales que existen dentro de los sistemas de nexo, como el flujo de recursos, los costos económicos y ambientales, pueden involucra complejidades computacionales (García y You, 2016). Por ello se deben explorar estrategias y formas de cuantificar aspectos clave dentro del nexo WEF. En esta tesis se presentan estrategias para evaluar la seguridad de los recursos agua,

energía y alimentos, y para optimizar la integración de recursos determinando el diseño óptimo de sistemas macroscópicos agua-energía-alimentos involucrando métodos para la generación de soluciones que consideren simultáneamente varios objetivos o actores para facilitar la toma de decisiones.

1.2 Hipótesis

Si se evalúan las relaciones entre los recursos energía, agua y alimentos en sistemas macroscópicos mediante modelos de optimización matemática entonces se podrán generar soluciones para apoyar la toma de decisiones acerca del diseño de sistemas sustentables energía-agua-alimentos que permitan mejorar la seguridad del nexo energía-agua-alimentos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar modelos de optimización para la gestión sostenible de recursos de sistemas macroscópicos orientados a maximizar la seguridad del nexo energía-agua-alimentos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar aspectos económicos, ambientales y sociales en la gestión óptima de recursos del sistema energía-agua-alimentos.
- Evaluar el diseño de un sistema agua-energía-alimentos bajo un esquema de múltiples partes interesadas.
- Analizar la seguridad del nexo energía-agua-alimentos bajo un esquema de justicia.
- Analizar diversos casos de estudio de distintas regiones de México con estrés de recursos.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Energía, agua y alimentos

El agua, la energía y los alimentos son recursos esenciales para el bienestar humano, el crecimiento social y económico y para el desarrollo sostenible. Durante muchos años se ha destacado la importancia del agua, ya que es un recurso esencial para sustentar la vida en la tierra. Cerca del 60% del cuerpo humano es agua, además, el agua es necesaria para la producción de productos químicos, energía y alimentos y es un solvente universal. Las reservas de agua en la Tierra rondan los 1.386 millones de hm^3 , de este volumen cerca del 96,5% está disponible en los océanos como agua de mar, y el 2,5% del agua total son reservas de agua dulce. Sólo el 0,26% de las reservas de agua dulce corresponde a lagos y ríos, siendo estas las fuentes más importantes para las necesidades humanas. Por lo tanto, se han realizado numerosos esfuerzos para mejorar la eficiencia de los procesos que involucran este recurso con el objetivo de realizar una gestión sostenible del agua, debido a que el agua es un recurso que no puede ser reemplazado por otros recursos o alternativas.

Por otro lado, la energía también es fundamental para la vida y para todos los procesos. El sol es la fuente fundamental de toda la energía disponible en la Tierra necesaria para la fotosíntesis y para la generación de combustibles fósiles, en los cuales la energía del sol quedó atrapada y fue transformada durante mucho tiempo y liberada cuando estos combustibles se quemaron. Los combustibles fósiles son la fuente de energía más utilizada para satisfacer las demandas de la sociedad, sin embargo, dado el impacto ambiental que esto conlleva, se han propuesto nuevas políticas para llevar a cabo una transición energética. Como se puede ver en la **Figura 2.1**, hoy en día, el petróleo, el carbón y el gas natural siguen siendo centrales en el sistema energético mundial.

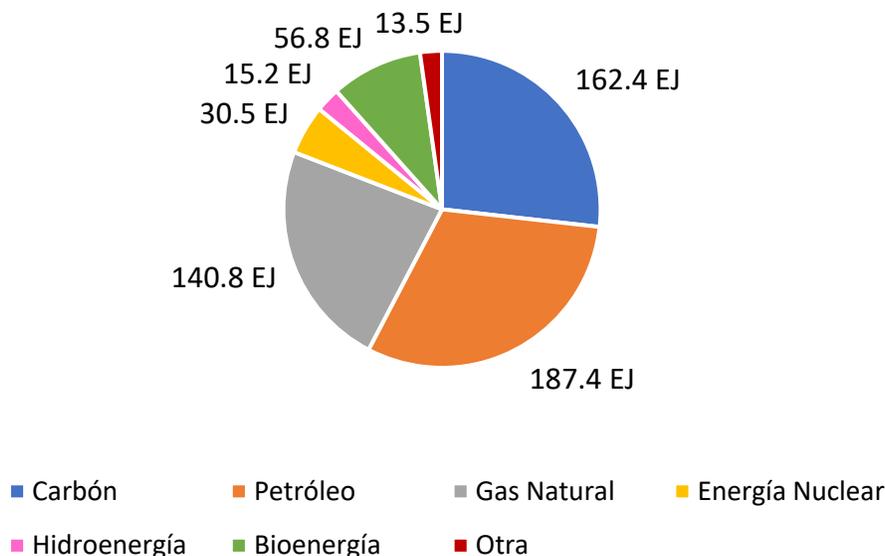


Figura 2. 1 Suministro mundial total de energía por fuente (IEA, 2021).

Además de la importancia del agua y la energía, la importancia de los alimentos es obvia y esencial. Una alimentación saludable nos proporciona los nutrientes y la energía necesarios para vivir. Sin embargo, la inseguridad alimentaria predomina en muchas regiones como en África, donde alrededor del 26% de la población sufre inseguridad alimentaria severa. Se estima que entre 720 y 811 millones de personas en el mundo sufrieron hambre en 2020 y alrededor de 660 millones de personas aún pueden sufrir hambre en 2030 (FAO, 2021). Los sistemas alimentarios están expuestos a la variabilidad climática y a las recesiones económicas, lo que motiva a transformar el sistema alimentario actual con una mayor resiliencia para proporcionar dietas saludables asequibles y sostenibles, así como para erradicar el hambre y la inseguridad alimentaria.

Analizando esto, la producción y consumo de estos recursos esenciales; el agua, la energía y los alimentos están íntimamente relacionados. Los vínculos entre estos recursos son complejos y se han estudiado ampliamente desde hace muchos años. El agua es necesaria para la producción de energía, el suministro de energía representa casi el 15 % de las extracciones mundiales de agua dulce, aproximadamente el 70 % del uso de agua dulce es destinado para la agricultura y la cadena de suministro de alimentos representa el 30 % del consumo mundial de energía (IRENA, 2015). El término “nexo” se refiere a una unión o

vínculo, y antes de que las interrelaciones entre el agua, la energía y los alimentos se abordaran juntas, las interacciones y sinergias entre dos de estos recursos, como el nexo agua-energía, el nexo agua-alimentos y el nexo energía-alimentos se han estudiado para mejorar las sinergias de los recursos.

2.1.1 Nexo agua-energía

Las interacciones entre el agua y la energía se denominan nexo agua-energía. Estos recursos están estrechamente relacionados (ver **Figura 2.2**). El agua es necesaria en los sistemas de producción de energía y los servicios de agua no pueden satisfacerse sin energía. Por lo tanto, aumentar la demanda de uno de estos recursos implica aumentar la demanda del otro. Teniendo esto en cuenta, comprender y mejorar el nexo agua-energía puede ayudar a enfrentar las crecientes demandas y los impactos del cambio climático.



Figura 2. 2 Interdependencias entre el nexo agua-energía.

El agua es un insumo crucial en casi todas las formas de energía, incluso para la energía primaria que se refiere a la energía recolectada directamente de los recursos naturales (es decir, carbón, gas natural, petróleo) y la energía secundaria, que abarca la energía producida al convertir la energía primaria o la energía disponible en su estado natural en el medio ambiente (es decir, electricidad). El sector energético se considera el segundo mayor usuario de agua después del sector agrícola (Mannan et al., 2018), y la generación de energía es la principal fuente de extracción de agua relacionada con la energía (EIA, 2018).

El uso del agua se puede clasificar en agua extraída y agua consumida, el agua extraída se refiere al volumen total de agua extraída de una fuente de agua donde, a menudo, una parte del agua se devuelve a la fuente y está disponible para ser utilizada nuevamente. Por otro lado, el agua consumida es la cantidad de agua que se retira para su uso y no se devuelve a su fuente. La extracción de agua en el sector eléctrico depende de varios factores, pero los más importantes son la combinación de combustibles y la tecnología utilizada. En los sistemas de energía, el tipo de tecnología de refrigeración utilizada es determinante en el consumo de agua. Sin embargo, comúnmente existe una compensación entre la eficiencia, el costo y el consumo de agua, ya que las tecnologías que tienen el costo más bajo también presentan una huella hídrica más alta. Por ello, considerar energías renovables no siempre es la solución para disminuir la extracción de agua, por ejemplo, la intensidad hídrica en las centrales nucleares es mayor que en las centrales de carbón o gas natural, en el caso de las turbinas de gas de ciclo combinado se requiere menos refrigeración y por lo tanto se obtiene un menor consumo de agua. Esto demuestra la importancia de la selección de la tecnología utilizada en el sistema de energía eléctrica, ya que pueden disminuir o no los requerimientos de agua y esto debe ser considerado especialmente en lugares con baja disponibilidad de agua.

Otro aspecto que debe abordarse son las necesidades de agua para la producción de energía primaria, como la extracción y el procesamiento de combustibles. Se requiere una gran cantidad de agua para la producción de biocombustibles, lo que representa la mayor fuente de consumo de agua para la producción de energía primaria. La cantidad de agua consumida para riego es muy variable, ya que depende de muchos factores como el tipo de materia prima, el clima y la tecnología utilizada, pero se estima que alrededor del 2% del agua total para riego se utiliza para cultivos dedicados a la producción de biocombustibles. En los últimos años, el uso de agua para el riego de cultivos destinados especialmente para la producción de biocombustibles ha ocasionado preocupaciones sobre las grandes cantidades de agua consumida, y se ha destacado que la producción de biocombustibles a partir de la agricultura podría ser más sostenible. Además, se debe considerar que las biorrefinerías requieren cantidades significativas de agua en la etapa de fermentación. Sin embargo, la producción de combustibles fósiles trae varios impactos ambientales. Por ejemplo, en el caso del carbón, es común que las aguas superficiales o subterráneas sean

contaminadas y la producción no convencional de petróleo y gas, además de ser un proceso tan intensivo en agua, genera gran cantidad de aguas residuales que deben eliminarse correctamente para evitar la contaminación de las aguas subterráneas.

Por lo general, el agua subterránea se utiliza como fuente principal de suministro de agua, que también depende de la energía. La energía es esencial para la extracción, el transporte y la distribución de agua, el tratamiento de aguas residuales y la desalinización. La cantidad de energía requerida en los diferentes aspectos del suministro de agua depende de la distancia y la elevación que debe recorrer el agua, la topografía, el clima, la temperatura, el volumen de agua y la tecnología utilizada. Se estima que cerca de 122,8 Mtep de energía se utilizan en el sector hídrico (IEA, 2020), y de la electricidad consumida, alrededor del 40 % se destina a la extracción de aguas subterráneas y superficiales, seguido del tratamiento de aguas residuales con un 25 %, y aproximadamente el 20% de la electricidad se utiliza para la distribución de agua a los consumidores (IEA, 2016). A nivel mundial, el agua superficial representa alrededor de dos tercios de todas las extracciones de agua y el agua subterránea alrededor de un tercio, mientras que los tratamientos de agua no convencionales, como la desalinización, satisfacen menos del 1% de las necesidades de agua.

2.1.2 Nexo agua-alimentos

El nexos agua-alimentos se refiere a las interacciones entre el agua y los alimentos (ver **Figura 2.3**). Es obvio que el agua es esencial para la producción de alimentos. Hoy en día, la agricultura es la principal responsable del consumo de agua. Según la FAO, alrededor del 70% del consumo mundial de agua se destina a actividades agrícolas, especialmente al riego (FAO, 2014). Las proyecciones para el 2050 indican un incremento en la demanda de alimentos de hasta un 60% (FAO, 2020) y, se espera que las extracciones de agua para riego aumenten un 10% (IEA, 2016), por lo que es necesario tomar acciones para motivar el uso de menos recursos para producir alimentos, ya que la producción sostenible de alimentos no será posible si el agua no se gestiona adecuadamente.



Figura 2. 3 Interacción entre el agua y los alimentos.

El consumo de agua para la producción de alimentos varía según el tipo de cultivo y las condiciones hidrometeorológicas. Además, los estilos de vida cambiantes han provocado variaciones en los patrones de demanda de alimentos, lo que ha modificado los requisitos de agua para la agricultura. Sin embargo, estudios sobre el consumo de agua en dietas omnívoras, vegetarianas y veganas han demostrado un mayor ahorro de agua en dietas vegetarianas y veganas (Zucchinelli et al., 2021). Por ejemplo, una dieta de supervivencia requeriría 1 m^3 de agua por día y per cápita, mientras que una dieta elaborada principalmente con productos animales necesita unos 10 m^3 por día y per cápita. Por otro lado, aumentar la producción de alimentos de calidad requiere más riego, y reducir el consumo de agua para la producción de alimentos implica mejorar los sistemas de riego, especialmente en regiones con baja disponibilidad de agua.

2.1.3. Nexo energía-alimentos

Las interrelaciones entre energía y alimentos componen el nexo entre energía-alimentos (**Figura 2.4**). Se requiere energía para la producción de alimentos, en el uso de combustibles fósiles para maquinaria, electricidad para bombear agua, energía para producir fertilizantes y en el almacenamiento, procesamiento, distribución y preparación de alimentos. Se estima que aproximadamente el 30% de la energía global disponible se consume en la cadena alimentaria agrícola. El sector alimentario consume globalmente aproximadamente 200 EJ por año (FAO, 2017), de los cuales un 45% corresponde a actividades de procesamiento y distribución (FAO, 2011). En los Estados Unidos de América, el uso total de energía para producir alimentos se divide en cuatro grupos principales: 21 % para cultivos, 14 % para

transporte, 11-16 % para procesamiento de alimentos y alrededor de 50 % para manipulación de alimentos.



Figura 2. 4 Nexo energía energía-alimentos.

Por otro lado, los alimentos o las plantas pueden utilizarse como energía de biomasa. Durante la fotosíntesis, las plantas verdes obtienen energía de la luz solar para convertir CO_2 y H_2O en azúcares simples y oxígeno que se libera a la atmósfera, mientras que los carbohidratos se pueden utilizar como energía de biomasa que se quema y se vuelve a convertir en CO_2 y H_2O . Así, se considera que la biomasa es un recurso neutro en CO_2 porque el CO_2 capturado durante la fotosíntesis se libera en la combustión de la biomasa.

En comparación con los combustibles fósiles, la biomasa tiene una baja densidad energética y un mayor contenido de materia volátil que proporciona estabilidad de ignición. La biomasa tiene valores caloríficos más bajos que los combustibles fósiles, la mayoría de ellos oscilando entre 10 y 20 MJ/kg de materia seca

La bioenergía considerando tanto el uso tradicional de la biomasa (energía para cocinar y calentar en fuegos o estufas simples e ineficientes) como la bioenergía moderna, aportan alrededor del 12% del consumo mundial de energía. La bioenergía moderna proporciona alrededor del 5,1 % de la demanda mundial total, lo que representa aproximadamente la mitad de todas las energías renovables en el consumo de energía final (REN21, 2020). La biomasa tiene varios impactos positivos; pero las principales desventajas de la energía de biomasa son que requiere grandes cantidades de agua y espacio terrestre. Además, la energía de la biomasa no es completamente limpia porque durante la conversión

de la biomasa se utiliza energía fósil adicional como calor o electricidad, lo que genera emisiones de CO₂.

La biomasa se puede convertir en formas útiles de energía, como calor, electricidad, combustibles y productos químicos, a través de diferentes vías de conversión que se clasifican en procesos termoquímicos, bioquímicos y químicos (**Figura 2.5**). Generalmente, los métodos químicos se utilizan para obtener productos más valiosos a partir de la biomasa. Los procesos termoquímicos se caracterizan por realizarse a mayores temperaturas y tasas de conversión, mientras que los procesos bioquímicos requieren tiempos de reacción bajos.

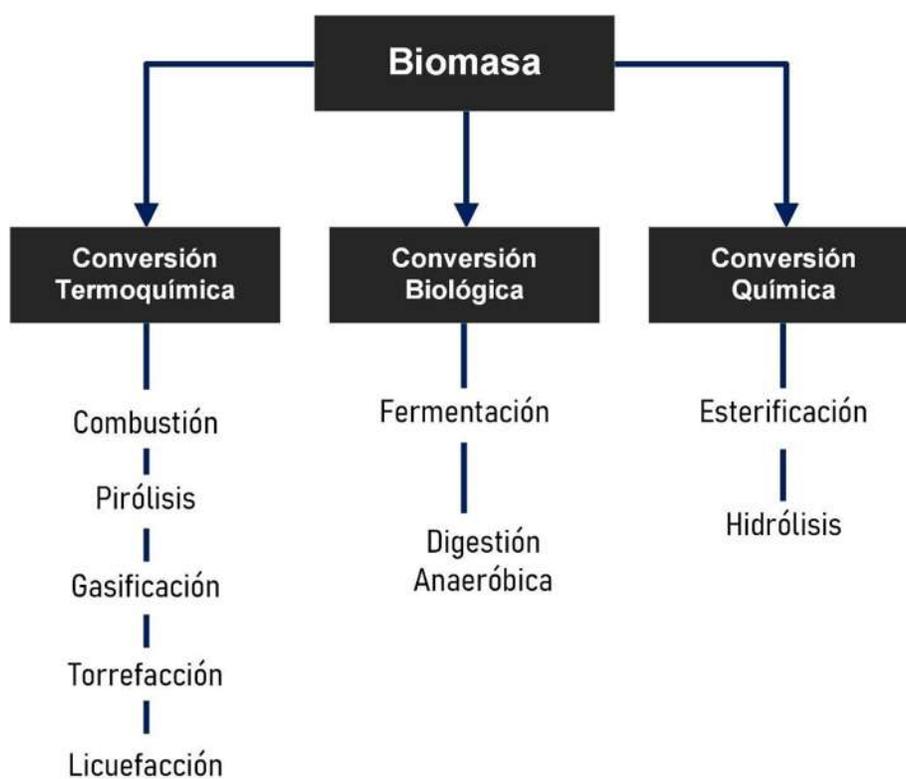


Figura 2. 5 Vías de conversión de biomasa.

2.1.4. Nexo energía-agua-alimentos

Las crecientes demandas de agua, energía y alimentos, la rápida urbanización, el crecimiento de la población y el cambio climático ejercen una enorme presión sobre los recursos disponibles que ya son limitados en muchas regiones. En los últimos años se han realizado varios esfuerzos para enfrentar estos desafíos con el fin de asegurar el acceso a estos recursos esenciales de una manera más sostenible a través de una adecuada integración de estos. El

nexo energía-agua-alimentos se conceptualizó por primera vez en la Conferencia Bonn en 2011 (Hoff, 2011) (**Figura 2.6**). El concepto de nexo destaca el estudio de las interdependencias de los recursos para identificar las sinergias y compensaciones entre ellos y buscar soluciones para una integración adecuada (Liu et al., 2015). Los sectores del agua, la energía y los alimentos están tan próximos que las actuaciones que se realicen en uno de ellos repercutirán en los demás (IRENA, 2015). Por ejemplo, el agua es necesaria para el abastecimiento del servicio público, para el uso agrícola, uso pecuario y para uso industrial. Además, el agua es requerida en los sistemas de producción de energía y en el proceso de extracción y procesamiento de combustibles fósiles. Por otro lado, la energía es indispensable para el tratamiento, purificación, desalinización y distribución del agua. Finalmente, el sector alimentario requiere de energía y agua y algunos cultivos pueden ser usados como biomasa para generar energía. Por otra parte, los alimentos pueden ser un indicador de agua virtual donde quiera que se encuentren. El nexo energía-agua-alimentos engloba numerosas sinergias por lo que se deben estudiar a fondo este concepto con el fin de maximizar tales sinergias, generar sistemas más eficientes y promover las buenas prácticas en la gestión de los recursos para dirigirse hacia el desarrollo sostenible.

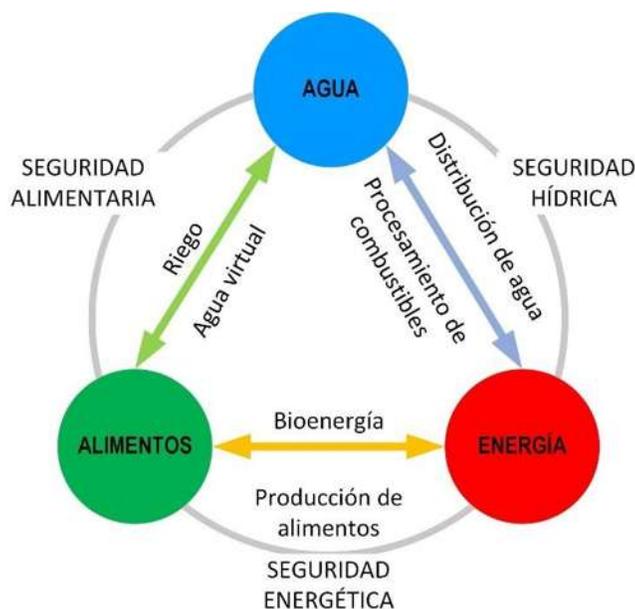


Figura 2. 6 Interacciones en el nexo energía-agua-alimentos.

El nexo agua-energía-alimento (WEF) es un enfoque que puede apoyar a los responsables de la toma de decisión en la evaluación y representación de compensaciones de los recursos en los diferentes sectores económicos, reconociendo las interdependencias entre los sistemas hídrico, energético, alimentario y de recursos naturales.

2.2. Optimización

Optimización es el uso de métodos y técnicas específicas para determinar una solución eficiente de un problema en específico. La optimización es de primordial importancia, debido a que sirve como instrumento en la toma de decisiones. El principal objetivo de la optimización es el de seleccionar la mejor solución de un conjunto de soluciones posibles. El grado de sensibilidad de la solución es cuantificada por medio del uso de una función objetivo, la cual debe ser minimizada o maximizada. La función objetivo estará sujeta a cierto número de restricciones, las cuales pueden ser de igualdad y/o desigualdad.

La optimización ha impregnado todos los ámbitos del quehacer humano. La sociedad moderna no sólo vive en un entorno de intensa competencia, sino que también se ve obligada a planificar su crecimiento de manera sostenible con la debida preocupación por la conservación de los recursos. Por lo tanto, se ha vuelto imperativo planificar, diseñar, operar y administrar los recursos de manera óptima. Los primeros enfoques han consistido en optimizar las actividades individuales de manera independiente; sin embargo, la tendencia actual es hacia un enfoque integrado: integrar síntesis y diseño, diseño y control, planificación, programación y control de la producción. El funcionamiento de un sistema puede estar regido por múltiples objetivos. La optimización de dichos sistemas requerirá estrategias especiales para manejar los múltiples objetivos para brindar soluciones más cercanas a los requisitos de los sistemas.

La teoría de la optimización había evolucionado inicialmente para proporcionar soluciones genéricas a problemas de optimización en dominios lineales, no lineales, no restringidos y restringidos. Estos problemas de optimización a menudo se denominaban problemas de programación matemática con dos clasificaciones distintivas, problemas de programación lineal (LP) y no lineal (NLP). Aunque la primera generación de problemas de programación se basaba en variables continuas, varias clases de problemas de asignación y

diseño requerían el manejo de variables enteras y continuas, lo que conducía a problemas de programación lineal y no lineal de enteros mixtos (MILP y MINLP, respectivamente).

La programación matemática involucra la formulación, solución y análisis de problemas de optimización. El estudio y análisis de los problemas incluye herramientas gráficas, algebraicas y computacionales. Existen tres elementos fundamentales en los problemas de optimización y se definen a continuación:

Variables de decisión: El primer elemento clave en la formulación de problemas de optimización es la selección de las variables independientes que sean adecuadas para caracterizar los posibles diseños candidatos y las condiciones de funcionamiento del sistema. Como variables independientes se suelen elegir aquellas que tienen un impacto significativo sobre la función objetivo.

Restricciones: Una vez determinadas las variables independientes, el siguiente paso es establecer, mediante ecuaciones o inecuaciones las relaciones existentes entre las variables de decisión. Estas relaciones son debidas, entre otras razones, a limitaciones en el sistema, a leyes naturales o a limitaciones tecnológicas y son las llamadas restricciones del sistema. Podemos distinguir dos tipos de restricciones:

Restricciones de igualdad: Son ecuaciones entre las variables de la forma:

$$h(x) = h(x_1, \dots, x_n) = 0$$

donde $h(x) : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ es una función real de variables reales definida sobre un conjunto A de números reales.

Restricciones de desigualdad: Son inecuaciones entre las variables de la forma:

$$g(x) = g(x_1, \dots, x_n) \leq 0$$

donde $g(x) : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ es una función real de variables reales definida sobre un conjunto A de números reales.

Función objetivo: Finalmente, el último ingrediente de un problema de optimización es la función objetivo, también llamado índice de rendimiento o criterio de elección. Este es el elemento utilizado para decidir los valores adecuados de las variables de decisión que

resuelven el problema de optimización. La función objetivo permite determinar los mejores valores para las variables de decisión. Independientemente del criterio seleccionado, dentro del contexto de la optimización matemática el adjetivo “mejor” siempre indica los valores de las variables de decisión que producen el mínimo o máximo valor (según el criterio utilizado) de la función objetivo elegida. Algunos de estos criterios pueden ser por ejemplo de tipo económico (costo total, beneficio neto), de tipo tecnológico (energía mínima, máxima capacidad de carga, máxima tasa de producción) o de tipo temporal (tiempo de producción mínimo) entre otros.

El planteamiento general para resolver problemas de este tipo es el siguiente:

$$\textit{Función Objetivo: } \min \textit{ o } \max f(x_1, \dots, x_n)$$

Sujeto a:

Restricciones de desigualdad:

$$g(x) = g(x_1, \dots, x_n) \leq 0$$

Restricciones de igualdad:

$$h(x) = h(x_1, \dots, x_n) = 0$$

En donde x_1, \dots, x_n representan variables de decisión.

Capítulo 3. Un enfoque sistemático para evaluar la seguridad del nexo energía-agua-energía-alimentos

3.1 Introducción

En los últimos años, el nexo WEF ha sido considerado como una herramienta eficiente para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El nexo WEF está estrechamente relacionado con los ODS, ya que el nexo permite mejorar el acceso a alimentos seguros, agua limpia y servicios energéticos asequibles. Además, el nexo WEF puede ser considerado como una forma de erradicar la pobreza, proteger el planeta, controlar el consumo de recursos y enfrentar la incertidumbre asociada al cambio climático y la urbanización. En este sentido, los enfoques del nexo WEF son indispensables para la promoción de los objetivos y el desarrollo sostenible de las regiones en desarrollo.

Actualmente, el desarrollo de indicadores referentes al nexo que permitan evaluar la interacción de los recursos y medir la sostenibilidad ha ganado interés en la comunidad científica. Se han propuesto muchos indicadores para evaluar de forma independiente el desempeño de los sectores del agua, la energía y los alimentos. En este contexto, el sector hídrico ha sido abordado mediante el desarrollo de indicadores para medir el consumo de agua (Fernández et al., 2020; Chen et al., 2016), la disponibilidad de agua (Herrera-Pantoja and Hiscock, 2015), la huella hídrica (D'Ambrosio et al., 2020; Vanham et al., 2019), y la seguridad hídrica (Jensen y Wu, 2018). El sector energético ha sido examinado por indicadores relacionados con el consumo de energía (Schindler et al., 2017), la seguridad energética (Augutis et al., 2020; Nie et al., 2018), la producción de energía (Kazemi et al., 2018) y la intensidad energética (Liu et al., 2017). Por otro lado, el sector alimentario ha utilizado indicadores relacionados con el consumo de alimentos (Programa Mundial de Alimentos, 2020), el rendimiento de los cultivos (Yang et al., 2018) y la producción de alimentos (Liu et al., 2019). A pesar de los numerosos estudios y metodologías para cuantificar diferentes características de los sectores hídrico, energético y alimentario, se han desarrollado muy pocas metodologías para cuantificar el consumo y la producción de agua, energía o alimentos como elementos de un solo sistema. Los indicadores que permiten la evaluación del nexo WEF son herramientas atractivas que ayudan a identificar los sectores más vulnerables. En este sentido, Saladini et al. (2018) propusieron una herramienta basada

CAPÍTULO 3. UN ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

en indicadores para medir los vínculos entre agua, energía y alimentos para lograr el desarrollo sostenible en la región del Mediterráneo. Yuan y Lo (2020) desarrollaron los "*Linked Indicators for FEW Availability*" (LIFEWAY), que es un índice compuesto que se puede utilizar para medir el logro de la sostenibilidad de un país. Un resumen de los estudios en los que se reportaron indicadores para medir la seguridad del nexo WEF se presenta en la **Tabla 3.1**. Estos están enfocados principalmente en la evaluación de la seguridad hídrica, energética y alimentaria a nivel nacional a través del análisis de disponibilidad y acceso a recursos. En el caso del índice ODS, la metodología está enfocada a la evaluación de la sostenibilidad considerando objetivos enfocados en aspectos sociales. Sin embargo, en estas metodologías no se evalúa la seguridad nexo WEF considerando el acceso, la disponibilidad y la sustentabilidad de los recursos energéticos, hídricos y alimentarios en el mismo índice. Además, los indicadores propuestos se utilizan para medir la seguridad o sostenibilidad nexo WEF a nivel país. Otra desventaja de los índices propuestos anteriormente es que no se pueden introducir fácilmente en modelos de optimización para mejorar la planificación y gestión de recursos o hacer proyecciones de años futuros con la implementación de políticas para facilitar la toma de decisiones. Por lo tanto, la contribución de este trabajo es el desarrollo de un enfoque sistemático llamado *Índice de seguridad del Nexo WEF* que involucra la evaluación de algunos de los ODS relacionados con el nexo. Este índice permite medir la seguridad del nexo a través de la evaluación de indicadores que representan la disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad del agua, la energía y los alimentos. Además, a través del *Índice de seguridad del Nexo WEF* es posible realizar proyecciones de las demandas de recursos, sus producciones y consumos para escenarios futuros en regiones a cualquier escala. De esta forma, será posible determinar los sectores más vulnerables para tomar acciones y generar políticas que enfrenten los desafíos actuales para garantizar el acceso sostenible a los recursos y servicios básicos en los próximos años.

Tabla 3. 1 Índices para medir la sustentabilidad o seguridad del Nexo WEF.

Indicador	Descripción	Referencia
SDG Index	El Índice ODS se construye a partir de indicadores ODS oficiales que reflejan el marco conceptual general de los 17 ODS. El Índice ODS mide el desempeño absoluto del país.	(United Nations, 2015)
RAND FEW Security Index	Índice compuesto por tres subíndices relacionados con el agua, la energía y los alimentos que a su vez comprenden indicadores de disponibilidad y accesibilidad. El índice se calcula para la evaluación de la seguridad del nexo energía-agua-alimentos.	(Willis et al.,2016)
LIFEWAY	Indicador a escala nacional que mide los logros de sostenibilidad en términos de agua, energía y alimentos para un país.	(Yuan and Lo, 2019)
STE FEW Security Index	Índice basado en los índices sectoriales bien establecidos del Índice Internacional de Riesgo de Seguridad Energética, el Índice de Seguridad Alimentaria Global y el Marco de Riesgo del Agua de Acueductos. El índice de seguridad STE FEW permite comparar los recursos de seguridad de diferentes países.	(Venghaus and Dieken, 2019)

3.2 Metodología

3.2.1 Planteamiento del problema

Uno de los mayores retos para lograr la sostenibilidad es garantizar la seguridad del agua, la energía y los alimentos. De esta manera, se introdujeron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para promover el desarrollo sostenible global y la protección del medio ambiente, reducir el hambre, mejorar la gestión de los recursos y la salud humana. Se han propuesto varios enfoques para garantizar el suministro y la gestión sostenibles de los recursos. Sin embargo, estos enfoques no abordan el estado de la seguridad del agua, la energía y los alimentos para los escenarios actual y futuro, donde se espera que cambien las condiciones. Por lo tanto, la seguridad del nexo WEF requiere ser cuantificada y abordada para brindar perspectivas sobre escenarios futuros, especialmente en regiones en desarrollo con escasez de recursos. Este trabajo presenta un índice para medir la seguridad del agua, la energía y los alimentos que se puede aplicar a nivel nacional o regional para comparar el progreso en la disponibilidad, acceso y sostenibilidad de los recursos. Los resultados obtenidos por el *Índice de seguridad del Nexo WEF* podrían ayudar en la generación de

políticas para el mejoramiento de los sectores en la región con el fin de alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible.

3.2.2 Caso de estudio

El estado de Sonora, ubicado en el norte de México, fue seleccionado como caso de estudio para evaluar la seguridad del nexo WEF. La selección del caso de estudio se basó en la distribución limitada y desigual de los recursos, lo que se atribuye a las condiciones geográficas de la región. Esta área está situada en el Desierto de Sonora, el desierto más cálido de México. Por otro lado, la zona sur de Sonora es conocida por su alto potencial en la producción de alimentos, aunque también en esta zona se han presentado serios problemas por la escasez de agua. Sonora es reconocida por su desarrollo industrial y económico, donde la principal actividad económica es la minería. México ocupa el primer lugar en producción de plata a nivel mundial, y Sonora es el estado líder en minería, particularmente en producción de plata. No obstante, la ubicación de sus minas en zonas con escasez de agua, ha provocado la competencia de los usuarios por el recurso hídrico. Adicionalmente, las prácticas inadecuadas en la minería han resultado en un alto consumo y contaminación del agua, lo que vuelve más desafiante el acceso al agua para todos los usuarios. En los últimos años, el incremento de la temperatura en Sonora ha generado cambios en la precipitación y disponibilidad de agua, y la creciente presión sobre las recourses para atender los servicios demandados por la sociedad ha generado un desequilibrio en el nexo WEF.

Se deben realizar varios esfuerzos para garantizar el acceso al agua principalmente en las ciudades industrializadas. Uno de los mayores retos del estado ha ocurrido en la ciudad de Hermosillo, que es la capital de Sonora. Hermosillo es la ciudad con el problema más grave de abastecimiento de agua en el país. Los ríos Sonora, San Miguel y Zanjón son los cuerpos de agua más cercanos a la ciudad (**Figura 3.1**); solían descargar en la presa Abelardo L. Rodríguez para abastecer de agua a la ciudad, pero actualmente esta fuente se encuentra completamente drenada. Además, las sequías extremas y la sobreexplotación han secado los embalses, incluidas las presas 'El Molinito' y Abelardo L. Rodríguez. En consecuencia, se construyó un acueducto para abastecer de agua desde la presa Plutarco Elías Calles "El Novillo" a Hermosillo. Sin embargo, esto ha provocado una disputa con los habitantes de la ciudad de Obregón, específicamente los usuarios agrícolas del agua en la región Yaqui,

CAPÍTULO 3. UN ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

porque afirman que la represa “El Novillo” les corresponde por cesión de derechos de riego (González-Bravo et al., 2015). En la actualidad existe un serio problema entre estas ciudades, ya que ha resultado difícil satisfacer la demanda de los usuarios agrícolas y urbanos. Los esfuerzos que se han realizado para satisfacer esta demanda han provocado conflictos y, por otro lado, esto ha provocado un deterioro ambiental, que pone en riesgo principalmente la disponibilidad de agua en los acuíferos de la región y de las poblaciones más cercanas.



Figura 3. 1 Cuencas hidrológicas en el estado de Sonora.

En reconocimiento de este problema, una forma de evaluar la sostenibilidad de los recursos es a través de la evaluación de la seguridad del nexo WEF. En la siguiente sección presentamos las principales características relacionadas con la seguridad del agua, energía y alimentos en el estado de Sonora.

Seguridad hídrica

La escasez de agua superficial en Sonora hace que el agua subterránea sea la principal fuente de abastecimiento. Sonora cuenta con un total de 62 acuíferos, pero debido a un manejo no sustentable, muchos de ellos actualmente sufren de intrusión salina y 18 se encuentran

CAPÍTULO 3. UN ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DEL
NEXO ENERGÍA-AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

sobreexplotados. La recarga total anual de estos acuíferos es de aproximadamente 3,279 hm³, y la extracción anual es de 3,313.482 hm³; por lo tanto, la disponibilidad global remanente ronda los -33.982 hm³, siendo deficitaria (CONAGUA, 2020a). Las principales cuencas hidrológicas del estado de Sonora son el río Sonora, el río Yaqui y el río Mayo (**Tabla 3.2**) (CONAGUA, 2018a). Las presas "Abelardo L. Rodríguez" y "El Molinito" se encuentran a orillas del río Sonora, mientras que las presas "Álvaro Obregón", "Lázaro Cárdenas" y "El Novillo" se ubican a lo largo del río Yaqui. Las principales características de estas presas se muestran en la **Tabla 3.3** (SINA, 2020). En Sonora los requerimientos de agua son de aproximadamente 7,293 hm³ por año, de los cuales 771 hm³ son utilizados por usuarios domésticos, 6,390 hm³ en el sector agrícola, 115 hm³ por industrias y 16 hm³ en producción de electricidad excluyendo hidroelectricidad (**Figura 3.2**) (CONAGUA, 2018b). Hermosillo es la ciudad más importante del estado de Sonora, y su desarrollo económico se ha basado principalmente en la agricultura y la ganadería. Según la Comisión Nacional del Agua, el consumo diario de agua por persona es de 380 L de agua por habitante por día (CONAGUA, 2018b).

Tabla 3. 2 Características de las principales cuencas hidrológicas del estado de Sonora (CONAGUA, 2018a).

Características	Río Sonora	Río Yaqui	Río Mayo
Precipitación (mm)	401.0	475	555
Escorrentía natural media (hm ³)	439.0	3,163	1,212
Área (km ²)	27,740.0	72,540	15,113
Longitud del río (km)	421.0	410	386
Temperatura media anual (°C)	24.4	20.8	23.0
Evaporación media anual (mm)	2,540.0	1,999	2,150

Tabla 3. 3 Principales características de las presas ubicadas en el caso de estudio (SINA, 2020).

Características	“Abelardo L. R.”	“El Novillo”	“El Molinito”	“Álvaro Obregón”	“Lázaro Cárdenas”
Capacidad (hm ³)	219.5	2,833.10	130.04	2,989.20	703.38
Volumen neto (hm ³)	0.01	1851.83	7.16	2,134.96	517.87

Suministro de agua por sectores

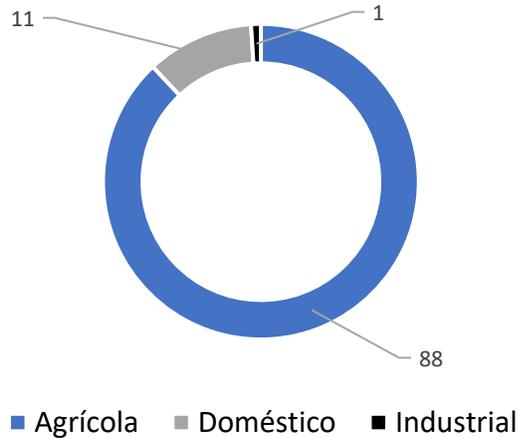


Figura 3. 2 Porcentaje de distribución de agua en el estado de Sonora, México.

Seguridad energética

La seguridad energética está relacionada con la disponibilidad de recursos naturales para la producción de energía, como los combustibles fósiles, la energía solar u otras fuentes primarias. Los principales componentes de la producción de energía primaria en Sonora son la leña, el carbón y la energía hidroeléctrica (**Figura 3.4**) (SENER, 2019). Existen tres centrales hidroeléctricas: Plutarco Elías Calles (El Novillo) en el municipio de Soyopa; el Oviáchic, en Cajeme; y el Mocúzari, en Álamos. La **Tabla 3.4** (CFE, 2020) presenta una lista de las plantas existentes en el estado. La capacidad instalada total es de 2.086 GW; de ese total, el 54% corresponde a centrales que utilizan petróleo (termoeléctricas), el 35% gas natural (centrales de ciclo combinado), el 8% hidroeléctrica (centrales hidroeléctricas) y el 3% diésel (centrales turbogas y diésel). El consumo de energía consta de cuatro sectores principales: agrícola, transporte, industrial, así como residencial, comercial y público. El consumo total de energía es de 320,6 petajulios (PJ), lo que representa el 59,9% del consumo interno bruto de energía del estado. Los porcentajes de consumo de energía en los diferentes sectores se presentan en la **Figura 3.3** (SENER, 2020). El consumo total de energía en Hermosillo alcanzó poco más de 90.32 PJ, lo que representa un 28% en comparación con el consumo de energía del estado, lo que la ubica como una de las ciudades de mayor consumo en Sonora. El consumo de energía desagregado en Hermosillo es de 78.6% en industria,

CAPÍTULO 3. UN ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

comercio y servicios, 13.5% en viviendas, 4.10% en agricultura y 3.8% en alumbrado público y bombeo de agua (SENER, 2013).

Tabla 3. 4 Centrales eléctricas en Sonora (*CFE, 2020*).

Planta	Tipo de entrada de energía	Capacidad (MW)	Localización
Plutarco Elías Calles (El Novillo)	Hydroenergía	135.00	Soyopa
Oviáchic	Hydroenergía	19.20	Cajeme
Mocúzari	Hydroenergía	9.60	Álamos
Puerto Libertad	Gasolina	632.00	Pitiquito
Carlos Rodríguez Rivero (Guaymas II)	Gasolina	484.00	Guaymas
Hermosillo	Gas Natural	227.02	Hermosillo
Hermosillo	Gas Natural	250.00	Hermosillo
Naco-Nogales	Gas Natural	258.00	Agua Prieta
Ciudad Obregón	Diesel	28.00	Cajeme
Caborca	Diesel	42.00	Caborca
Yécora	Diesel	1.80	Yécora

Consumo de energía

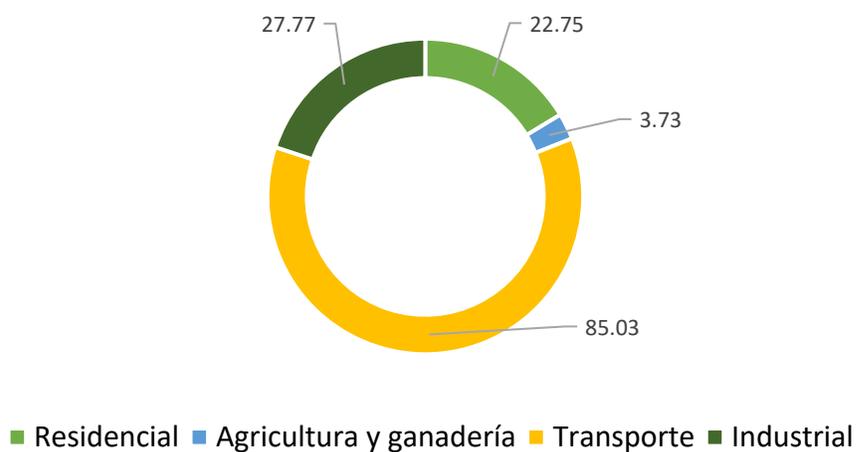


Figura 3. 3 Porcentaje de consumo de energía por sector en Sonora.

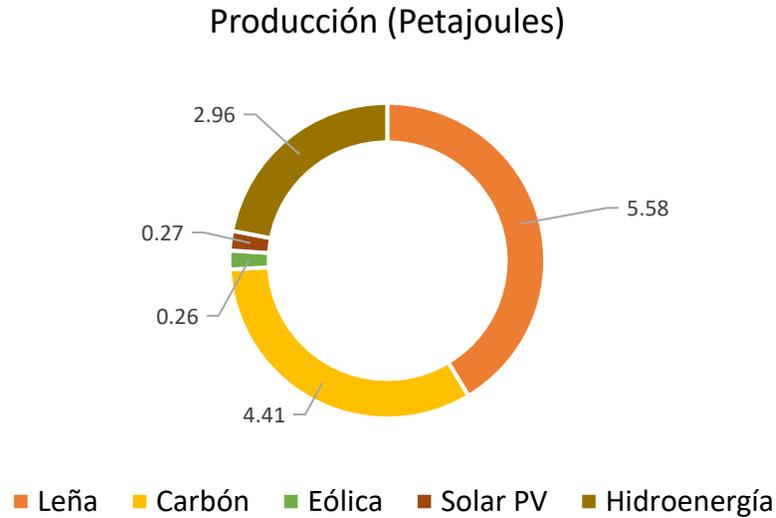


Figura 3. 4 Producción de energía primaria en Sonora.

Seguridad alimentaria

El estado de Sonora tiene una extensión territorial de 18,484,644 ha, representando el 9.2% de la superficie Nacional. De esta superficie, 759,476 ha están destinadas a uso agrícola, lo que representa el 4,1% de la superficie total del estado. Además, del total de la superficie agrícola, cerca del 90% corresponde a agricultura de regadío y el resto a agricultura de secano. El sector agrícola en el estado de Sonora se encuentra dividido en diferentes distritos de riego (CONAGUA, 2020c). Para el caso de estudio, los distritos de riego son 051 Costa de Hermosillo, 041 Río Yaqui, 018 Colonias Yaquis, 038 Río Mayo y 084 Guaymas. La **Tabla 3.5** (CONAGUA, 2020b) muestra los principales datos de los distritos de riego. Los principales cultivos de riego que se producen en el estado de Sonora son el trigo en grano (52%), la alfalfa (6%), el maíz en grano (6%) y el garbanzo en grano (6%) (SAGARPA, 2020). Los cultivos restantes se cultivan en el 30% del área total de regadío del estado. Por grupos de cultivos, los granos son los cultivos más sembrados dentro del estado de Sonora, con el 57.4% del área total cultivada. En segundo lugar, se encuentra el grupo de forrajes con el 12% del área total; y los árboles frutales ocupan el tercer lugar y las hortalizas junto con las legumbres secas en el cuarto lugar. El uso y manejo del agua son esenciales para el desarrollo agrícola. Actualmente, el sector agrícola opera con una eficiencia del 38%. Esto debido al mal estado de la infraestructura hidráulica y al uso generalizado de sistemas de

riego por gravedad e inundación, que es la principal causa de la pérdida de grandes volúmenes de agua.

Dada la complejidad de la situación actual en Sonora, es crucial gestionar adecuadamente el agua para asegurar su acceso en los diferentes sectores. Al mismo tiempo, es importante mejorar la producción de alimentos y energía y evaluar las interrelaciones entre estos recursos.

Tabla 3. 5 Principales características de los distritos de riego en la región (CONAGUA, 2020b).

Distrito	Área total (ha)	Superficie regada (ha)	Volumen distribuido (hm ³)
Costa de Hermosillo 051	117,360	47,933	416.7
Rio Yaqui 041	232,792	207,132	2,106.2
Colonias Yaquis 018	22,880	18,280	235
Rio Mayo 038	95,989	76,133	609.2
Guaymas 084	20,042	11,670	78.3

Índice de seguridad del nexo agua-energía-alimentos

El Índice de Seguridad del Nexo WEF es una métrica para evaluar el progreso en agua, energía y seguridad alimentaria de una región (r) basada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular los objetivos 2 Hambre Cero, 6 Agua Limpia y Saneamiento y 7 Energía Limpia y Asequible. Estos objetivos están sumamente interrelacionados con el resto de los objetivos enumerados en la Agenda 2030; por lo tanto, una mejora en el nexo WEF se reflejará en una mejora de la mayoría de los objetivos para el desarrollo sostenible.

El Índice de Seguridad del Nexo WEF está compuesto por nueve parámetros, los cuales se presentan en un gráfico radial para visualizar las deficiencias en los sectores de recursos. Los parámetros son indicadores de Seguridad Hídrica, Energética y Alimentaria en una región r . La seguridad hídrica se evalúa a través de tres parámetros: Disponibilidad de agua (W-1), Acceso al agua (W-2) y sostenibilidad del agua (W-3).

La disponibilidad de agua (W-1) se calcula como la relación entre el agua generada en la región y la huella hídrica entre el agua generada:

$$(W-1)_r = \frac{\text{Agua total generada}_r - \text{Consumo total de agua}_r}{\text{Agua total generada}_r} \quad (3.1)$$

La accesibilidad de agua (W-2) indica la población que tiene acceso a los servicios de agua:

$$(W - 2)_r = \frac{\text{Población total}_r - \text{Población sin acceso agua}_r}{\text{Población total}_r} \quad (3.2)$$

La disponibilidad de agua ($W-3$) se calcula como la relación entre la huella hídrica y el agua importada para satisfacer la demanda de la región.

$$(W - 3)_r = \frac{\text{Consumo total de agua}_r - \text{Agua importada}_r}{\text{Consumo total de agua}_r} \quad (3.3)$$

En el caso de la energía, se evalúan los indicadores de disponibilidad de Energía ($E-1$), acceso a electricidad ($E-2$), y sustentabilidad energética ($E-3$). La disponibilidad de energía ($E-1$) determina la relación entre la capacidad energética de la región y la huella energética.

$$(E - 1)_r = \frac{\text{Capacidad energía total}_r - \text{Consumo total de energía}_r}{\text{Capacidad energía total}_r} \quad (3.4)$$

La accesibilidad de energía ($E-2$) representa a la población con acceso a la energía en la región:

$$(E - 2)_r = \frac{\text{Población total}_r - \text{Población sin acceso energía}_r}{\text{Población total}_r} \quad (3.5)$$

La sustentabilidad energética ($E-3$) se calcula como la huella energética menos la energía generada por energías renovables entre la huella energética:

$$(E - 3)_r = \frac{\text{Consumo total de energía}_r - \text{Energía no renovable}_r}{\text{Consumo total de energía}_r} \quad (3.6)$$

Por último, la disponibilidad de alimentos ($F-1$), el acceso a alimentos ($F-2$), y la sustentabilidad de alimentos ($F-3$) son los parámetros utilizados para evaluar la seguridad alimentaria. La disponibilidad de alimentos ($F-1$) es igual a la energía dietética promedio requerida por persona para un estilo de vida saludable menos la energía dietética promedio consumida entre la energía dietética promedio requerida:

$$(F - 1)_r = \frac{\text{Energía promedio requerida}_r - \text{Consumo promedio de energía}_r}{\text{Energía promedio requerida}_r} \quad (3.7)$$

La accesibilidad de alimentos ($F-2$) representa la población sin desnutrición:

$$(F - 2)_r = \frac{\text{Población total}_r - \text{Población sin acceso a alimentos}_r}{\text{Población total}_r} \quad (3.8)$$

La sustentabilidad de alimentos ($F-3$) indica la relación entre los alimentos consumidos en el sector nacional y los alimentos importados:

$$(F-3)_r = \frac{\text{Consumo total de alimentos}_r - \text{Alimentos importados}_r}{\text{Consumo total de alimentos}_r} \quad (3.9)$$

Todos los indicadores son evaluados por las Ecuaciones (3.1)-(3.9). Un resultado de 1 (100%) indica el mejor desempeño del parámetro, y el promedio de los nueve parámetros para una región compone el índice de seguridad del nexo WEF de la región. Es importante mencionar que un resultado de 1 para los parámetros es casi imposible de lograr ya que el desarrollo sostenible es difícil de alcanzar.

El Índice de Seguridad del Nexo WEF podría aplicarse para la evaluación de una región a cualquier escala y podría usarse como herramienta de apoyo para la toma de decisiones, pero no da una solución para lograr la seguridad del nexo. La idea principal de este enfoque es revelar el estado de la seguridad del agua, la energía y los alimentos y mostrar las debilidades de los sectores que requieren una pronta intervención a través de la evaluación de los indicadores propuestos.

3.3 Evaluación de la seguridad del Nexo agua-energía-alimentos

Se realizó la evaluación de la seguridad del Nexo en Sonora para los años 2013, 2015 y 2019. Además, a través de la información de los últimos años relacionada con el manejo e integración de recursos, se evaluó el Índice de Seguridad del nexo WEF para los años 2025 y 2030. Los índices resultantes están en un rango de valores de 0 a 1 y su representación visual es a través de gráficos de radar con nueve vértices. El color rojo representa la situación más crítica para la seguridad del índice, el naranja representa el riesgo medio y la zona verde el riesgo bajo (**Figura 3.5**). En la siguiente sección se describen los avances en materia de seguridad del nexo WEF en el estado de Sonora.

CAPÍTULO 3. UN ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

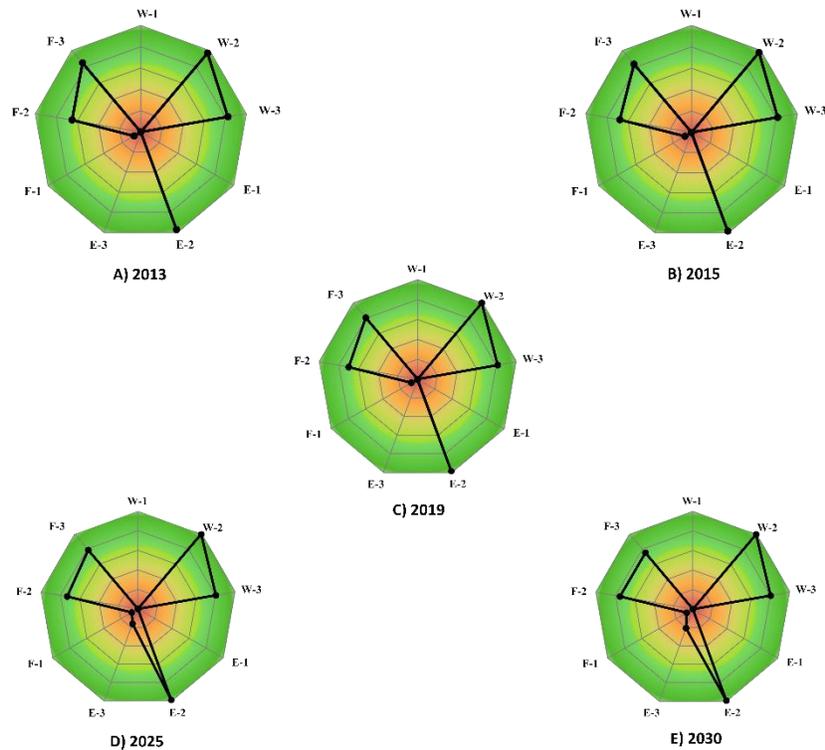


Figura 3.5 Evaluación del índice de seguridad hídrica-energética-alimentaria para 2013, 2015, 2019, 2025 y 2030.

3.3.1 Progreso en la seguridad del nexo agua-energía-alimentos

La evaluación de los indicadores para los diferentes años analizados muestra el avance de la gestión de los sectores agua, energía y alimentos. Se evaluó la Seguridad del Nexo WEF de años anteriores (2013 y 2015), así como el año más reciente con datos disponibles (2019) creando una tendencia que permite realizar proyecciones hacia años posteriores (2025 y 2030). La **Figura 3.5** muestra el esquema de los resultados para todos los años analizados. El esquema para los años 2013 y 2015 exhibe una tendencia similar. Estos resultados indican que, en este período de tiempo, no se implementaron acciones en la región para mejorar la situación de los sectores analizados. En cuanto a la seguridad energética, el bajo valor del indicador de disponibilidad de energía (E-1) se atribuye a la baja capacidad del sector energético en Sonora, la cual no alcanza para cubrir la demanda. Cabe señalar que la capacidad energética representa solo alrededor del 14% del consumo total de energía.

CAPÍTULO 3. UN ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

Además, el indicador de sustentabilidad energética (E-3) también presenta un valor bajo debido a la baja generación de energía renovable del estado. A pesar de ello, el indicador de accesibilidad energética (E-2) presenta una ejecución satisfactoria ya que la demanda de los usuarios fue cubierta con la energía generada en el estado y la energía importada de otras regiones.

Por otro lado, producto de la sobreexplotación y mala gestión de los recursos, el indicador de disponibilidad de agua (W-1) presenta un panorama desfavorable, ya que el agua utilizada en los diferentes sectores fue mayor que el agua disponible en la región. No obstante, el acceso al agua (W-2) de la población se logró en su casi totalidad gracias a los esfuerzos que se han realizado para abastecer de agua a la población. La demanda de agua se cubre con el agua disponible en Sonora y el agua importada de otras regiones, esto se expresa en el indicador de sostenibilidad hídrica (W-3).

Los indicadores de acceso a agua (W-2) y sustentabilidad (W-3), así como acceso a alimentos (F-2) y sustentabilidad alimentaria (F-3), se ubicaron en la zona de color verde que representa riesgo bajo en años anteriores. El acceso a agua (W-2) y alimentación (F-2) fueron los sectores más favorecidos en 2015 con respecto al desempeño de 2013, debido al aumento de los sistemas de distribución de agua potable en el estado y la disminución de la población desnutrida. El estado de Sonora se ha destacado por su destacada actividad agrícola, cuenta con cinco distritos de riego en los que se cultivan principalmente granos. La destacada actividad agrícola en Sonora ha favorecido la accesibilidad (F-2) y la sostenibilidad de la seguridad alimentaria (F-3), esto debido a que no se requiere importar alimentos en cantidades significativas. Sin embargo, la disponibilidad de alimentos (F-1) se encontró en alto riesgo, debido a los hábitos alimentarios poco saludables de la población.

En el año 2019 (**Figura 3.6**), los indicadores de acceso a la energía (E-2), disponibilidad de agua (W-1), acceso al agua (W-2) y sostenibilidad del agua (W-3) fueron prácticamente similares a los anteriores analizados años, incluso con un aumento de la población del 5% con respecto a 2015. En el sector alimentario, los indicadores de acceso a alimentos (F-2) y sostenibilidad alimentaria (F-3) mostraron una mejora debido a que disminuyó el número de personas en desnutrición. Por otra parte, como consecuencia del aumento de la producción agrícola, se reduce la importación de alimentos. En cuanto a la seguridad energética, el indicador de accesibilidad energética (E-2) continuó con poco riesgo, alcanzando un valor de

CAPÍTULO 3. UN ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

0,988 (98,8%) debido al aumento de las redes de distribución de energía en la zona. Sin embargo, se deben hacer grandes esfuerzos para reemplazar las tecnologías fósiles por energías renovables para mejorar la sostenibilidad y la disponibilidad de energía (E-1 y E-3).

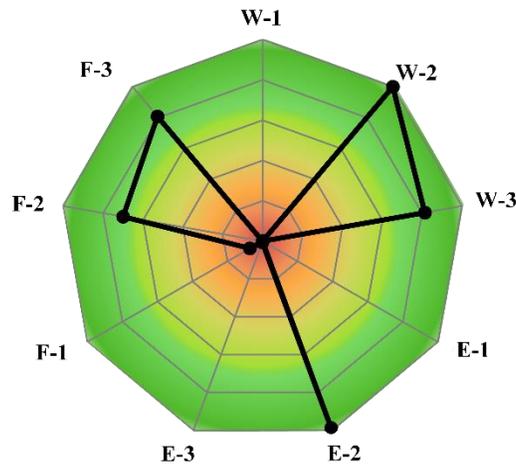


Figura 3. 6 Evaluación del índice de seguridad para el año 2019.

Con base en el comportamiento de los recursos en los años anteriores, se realizaron proyecciones para el estudio de la seguridad del nexo WE. En este trabajo se evaluaron los años 2025 y 2030 para tener una perspectiva de avance en el cumplimiento de las metas presentadas en la agenda de desarrollo sostenible. Los resultados muestran que la disponibilidad de recursos es un problema preocupante en los tres sectores del nexo. La disponibilidad de agua ha sido uno de los mayores desafíos que ha enfrentado el estado; sin embargo, no se han tomado las medidas adecuadas para una mejor gestión de los recursos hídricos. Esto a su vez se refleja en los indicadores de disponibilidad de agua (W-1) y sustentabilidad del agua (W-3), ya que se espera que la población aumente en los próximos años, la demanda de agua superará la oferta de agua, por lo tanto, la importación de agua continuará para garantizar el acceso al agua de la población.

CAPÍTULO 3. UN ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

Al mismo tiempo, se espera que aumenten los indicadores de acceso a la energía (E-2) y sostenibilidad (E-3). El problema de la seguridad energética en Sonora radica en su baja capacidad energética, su mínima generación de energía por fuentes renovables, su dependencia de combustibles importados y su alto consumo energético. De acuerdo con la Ley General de Cambio Climático (SEMARNAT-INECC, 2016), el estado debe hacer una transición para que el 40% del total de la energía consumida sea a través de fuentes renovables para el 2030, estas acciones promoverán el uso de energías renovables y con ello el indicador de sustentabilidad mejorará notablemente (E-3).

En el caso del sector alimentos, se espera que la disponibilidad de alimentos (F-1) se mantenga en riesgo ya que no se observa una mejora en la evaluación de los índices. Esta situación se deriva de que los alimentos no son suficientes para satisfacer las necesidades alimentarias con el contenido nutricional que requiere la población para mantener una dieta saludable, y a su vez puede provocar un aumento de la desnutrición y obesidad. Esto está vinculado al indicador de acceso a los alimentos (F-2) que indica un equilibrio entre la población total y la población desnutrida. Además, la sobreexplotación de los suelos y los cambios en el uso de la tierra pueden conducir a un aumento del riesgo para los indicadores de acceso a los alimentos (F-2) y sostenibilidad alimentaria (F-3). La mejora en el sector de alimentos en Sonora podría llevar a disminuir la cantidad de alimentos importados. Una forma de prevenir y abordar estos problemas hoy en día es la implementación de tecnologías y políticas de riego más eficientes enfocadas en reducir el agotamiento del agua para garantizar la seguridad del Nexo.

Tabla 3. 6 Tasa de crecimiento porcentual de 2015 a 2030.

Año	Agua			Energía			Alimentos		
	W-1	W-2	W-3	E-1	E-2	E-3	F-1	F-2	F-3
2015	-20.41	0.91	-1.30	29.56	0.93	145.29	0.00	4.62	-1.36
2019	-4.59	2.46	-0.02	-35.17	0.71	74.77	0.00	2.94	-3.11
2025	316.40	0.00	-0.97	-15.74	0.35	2558.46	0.00	4.29	-2.75
2030	37.04	0.00	-0.47	-20.92	0.25	28.17	0.00	3.19	-4.25

La **Tabla 3.6** describe la tasa de crecimiento porcentual de 2015 a 2030, donde una disminución en los indicadores se denota con un signo negativo (-). Para el cálculo de la tasa de crecimiento porcentual se utilizó el enfoque lineal de la ecuación 10.

$$\% \Delta = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (3.10)$$

Donde V_1 representa el valor del indicador presente y V_0 representa el valor del indicador pasado. El sector energético es el de mayor crecimiento principalmente en sustentabilidad (E-3) por el incremento de fuentes renovables. En contraste, se espera que el indicador de disponibilidad de agua (W-1) disminuya, así como la sostenibilidad del agua y los alimentos para el año 2030. En la **Figura 3.7**, se ilustran en el mismo radar los indicadores evaluados para todos los años analizados. Este gráfico muestra la tendencia en la evaluación del Índice de Seguridad WEF. Es importante señalar que a través de la evaluación de estos indicadores es posible tomar decisiones a mediano y largo plazo. Además, el Índice de Seguridad WEF puede ser una herramienta eficiente para el desarrollo de políticas que podrían ayudar a mejorar la seguridad de cada uno de los sectores involucrados a través de una planificación sostenible.

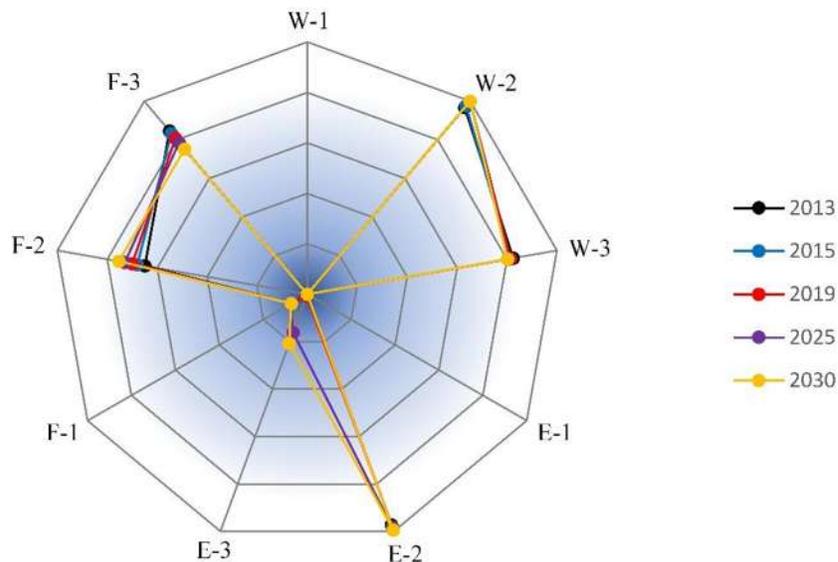


Figura 3. 7 Evaluación de los índices de seguridad del nexo WEF durante 17 años.

La **Figura 3.7** muestra el estado actual de producción y consumo de los sectores de Agua, Energía y Alimentos en el Estado de Sonora. Si bien el análisis de la seguridad WEF a nivel

estatal presenta algunos índices cercanos a 1 (W-2, E-2, F-2, W-3, F-3); es importante mencionar que en este estado existe una desigualdad en la distribución espacial de los recursos. En el caso de la seguridad hídrica, se debe prestar especial atención a la disponibilidad de agua e incluir las medidas necesarias que ayuden a mitigar este problema, tal es el caso de implementar el riego por goteo, logrando ahorros del 10 al 15% en el consumo de agua en comparación con otros tipos de riego, así como el ahorro de agua doméstica. El pronóstico para el año 2030 muestra la disminución de los indicadores de disponibilidad y sostenibilidad hídrica como consecuencia de la sobreexplotación de los recursos y la necesidad de trasvasar agua de otras cuencas para satisfacer las necesidades hídricas de los usuarios de la región. En cuanto al sector energético, es necesario aprovechar el recurso solar para implementar tecnologías solares para la generación de energía eléctrica y de esta manera aumentar la capacidad energética.

La evaluación del índice de seguridad WEF ayuda a cuantificar las tendencias en la seguridad de los recursos para lograr una mejor comprensión de las interrelaciones entre los recursos. Además, permite visualizar las perturbaciones que ponen en riesgo el desarrollo de la región y permite a los tomadores de decisiones implementar políticas y acciones para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible.

3.4 Conclusiones

En este trabajo se presentó un enfoque para evaluar la seguridad del Nexo WEF considerando nueve indicadores que representan el acceso, la disponibilidad y la sostenibilidad del agua, la energía y los alimentos. Estos indicadores conforman el índice de seguridad del Nexo WEF, que es una herramienta útil para medir el progreso en la seguridad del nexo con base en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así como también permiten identificar las áreas que requieren una pronta intervención para la implementación de políticas hacia el desarrollo sostenible. El estado de Sonora se utilizó como estudio de caso. Este estado está constituido en su mayor parte por un territorio desértico donde predominan las actividades mineras. Además, la parte sur del estado ha sido económicamente importante debido a las actividades agrícolas y ganaderas. Este contraste lleva a evaluar la situación de los recursos. Los resultados muestran que, debido a la baja disponibilidad de agua, el estado depende en gran medida de la importación de agua para garantizar su acceso, pero la importación interna y externa de agua puede generar conflictos sociales y problemas ambientales entre las regiones,

CAPÍTULO 3. UN ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA EVALUAR LA SEGURIDAD DEL NEXO ENERGÍA-AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

poniendo en peligro la sostenibilidad de los recursos. en riesgo. Sin embargo, para el año 2030 habrá un pequeño aumento en el acceso, disponibilidad y sostenibilidad del agua. Por lo demás, la seguridad alimentaria y energética no presenta el mejor desempeño ya que el crecimiento porcentual de la seguridad alimentaria es inferior a los últimos años en términos de accesibilidad, y presenta una disminución en el indicador de sostenibilidad. El sector energético es el que presenta áreas más vulnerables debido a que la capacidad de este sector no es suficiente para cubrir la alta demanda que se requiere en el estado. No obstante, las proyecciones para 2030 muestran que el indicador de sostenibilidad energética podría mejorar con la implementación de tecnologías renovables y, en consecuencia, también mejorará la disponibilidad y el acceso a la energía.

Se deben realizar más investigaciones para comprender las interrelaciones de estos recursos vitales y, por lo tanto, implementar estrategias y políticas efectivas para lograr el desarrollo sostenible mediante el cumplimiento de los ODS para 2030. La evaluación del Índice de seguridad WEF es una herramienta eficaz que se puede utilizar para evaluar y comprender las sinergias entre los recursos a cualquier nivel de escala y proporcionar el estado actual de los recursos en las perspectivas social, económica y ambiental. Además, el índice podría incluirse en los modelos de toma de decisiones para obtener una mejor representación de la realidad si se pretende implementar políticas en escenarios futuros. Este estudio destaca la relevancia de tener en cuenta una métrica para medir la seguridad del agua, la energía y los alimentos. Además, es replicable a otras regiones del mundo. La principal limitación del enfoque propuesto es que requiere datos precisos.

Capítulo 4. Evaluación del nexo agua-energía-alimentos a través de un enfoque de optimización de múltiples partes interesadas

4.1 Introducción

Uno de los principales desafíos para lograr la sostenibilidad del nexo WEF es la gestión integrada de recursos y la implementación de procesos con la participación de múltiples partes interesadas tales como el gobierno, las agencias reguladoras, la sociedad civil y el sector privado los cuales son guiados por diversos intereses. Generalmente, la toma de decisiones en los modelos de optimización se limita a satisfacer el interés de uno de los actores involucrados. Sin embargo, abordar el problema de esta manera podría generar conflictos entre los actores. Se han desarrollado muchas metodologías cualitativas para apoyar la toma de decisiones entre múltiples partes interesadas para una buena gestión del nexo (Thabrew et al., 2009; Bahadorestani et al., 2020). Sin embargo, en estos métodos no se cuantifica el nivel de satisfacción de los stakeholders en el logro de sus objetivos. La toma de decisiones en torno al nexo WEF debe considerar los objetivos económicos, ambientales y sociales en forma conjunta, así como a los stakeholders; sin embargo, implementar modelos de optimización que abarquen múltiples objetivos no es una tarea trivial debido a que el problema se vuelve complejo y difícil de resolver. Este trabajo presenta un modelo general para la producción de agua, energía y alimentos a través de la selección y ubicación óptima de tecnologías en una región para cubrir las necesidades de agua, energía y alimentos de los usuarios agrícolas, ganaderos, domésticos e industriales. Adicionalmente, se consideran tecnologías de conversión de residuos a energía (WtE) y plantas de reciclaje para la gestión sustentable de los residuos sólidos municipales (MSW). La contribución de este trabajo es la evaluación del nexo WEF a nivel macroscópico a través de un marco de múltiples partes interesadas que proporciona información cuantitativa sobre la satisfacción de los principales objetivos de las partes interesadas. La integración de recursos se aborda atendiendo a objetivos económicos y ambientales, como el costo del sistema y la minimización de emisiones de gases de efecto invernadero.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

4.2 Metodología

En esta sección se presenta el planteamiento del problema, el modelo matemático propuesto y el caso de estudio.

4.2.1 Planteamiento del problema

Actualmente, hay muchas regiones que enfrentan los impactos del cambio climático, la contaminación y la escasez de recursos. Uno de los problemas más graves es la escasez de agua, principalmente en los países en vías de desarrollo donde el problema se ha agudizado por la falta de políticas públicas para la protección de los cuerpos de agua, así como por la falta de infraestructura eficiente para llevar a cabo adecuadamente la gestión del agua. En esta situación, el nexo WEF se ha visto alterado ya que al no tener seguridad hídrica no es posible alcanzar la seguridad alimentaria y energética (Mannan et al., 2018; Terrapon-Pfaff et al., 2018; Zhang et al., 2018). En este sentido, la planificación macroscópica del nexo WEF es fundamental en regiones donde predomina la escasez de recursos. El modelo propuesto se representa en la **Figura 4.1** y considera lo siguiente:

- Reúso del agua mediante plantas de tratamiento de agua nuevas o existentes.
- Producción de los principales cultivos de la región.
- Balances de agua para la producción de carne vacuna, carne de pollo, huevos y leche.
- Estimación de las emisiones generadas por los componentes del sistema.
- Plantas de conversión de residuos a energía (waste to energy technologies (WtE)).
- Producción de energía eléctrica en centrales eléctricas convencionales y parques solares.

A través de la implementación de tecnologías basadas en restricciones operativas, económicas y ambientales, será posible la integración de recursos para ser dirigidos hacia un enfoque de economía circular.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

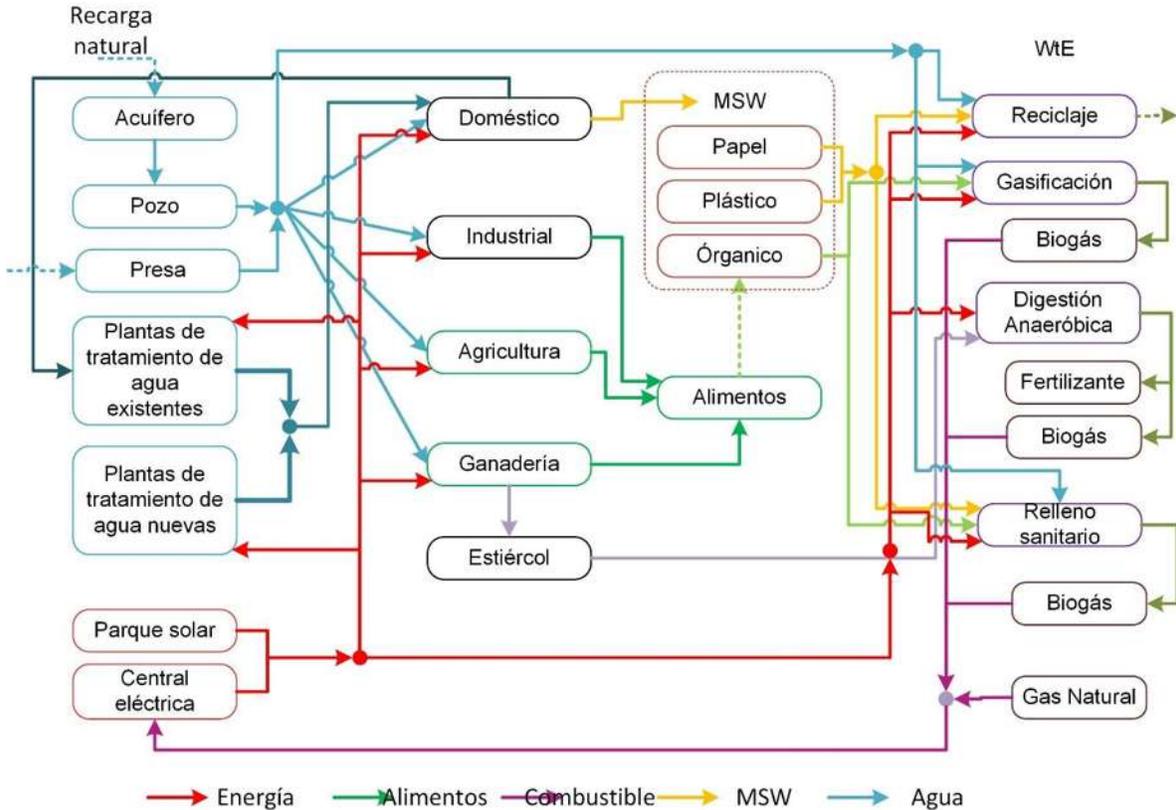


Figura 4. 1 Superestructura propuesta para la integración de recursos a nivel macroscópico.

4.2.2 Modelo matemático

En esta sección se presenta la formulación de un modelo de Programación Mixto Entero Lineal para la gestión sostenible del nexo WEF, el modelo determina la selección y ubicación de tecnologías en una región para cubrir las demandas de agua, energía y alimentos para usuarios agrícolas, pecuarios, domésticos e industriales. El modelo matemático se presenta esquemáticamente en la **Figura 4.1**. La electricidad generada en centrales eléctricas y parques solares se utiliza para cubrir la demanda energética de la región para usuarios domésticos e industriales, así como la energía requerida para el tratamiento de residuos. En el caso de la demanda de agua, ésta se cubre con el agua regenerada que aportan las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes y el agua proveniente de acuíferos y presas. Además, se considera como alternativa la instalación de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales para disminuir el consumo de agua fresca y utilizar el agua regenerada en el sector doméstico. El agua utilizada en el sector agrícola está integrada para la producción de

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

los principales cultivos de la región. En el caso de la ganadería, bovinos y aves, se utiliza para determinar la producción de carne, leche y huevos. Los desechos del ganado se envían a las plantas de digestión anaeróbica para capturar el biogás y obtener fertilizante. Por otro lado, los residuos sólidos municipales (MSW) generados en la región pueden ser enviados a tecnologías de conversión de residuos a energía (WtE) y tecnologías de reciclaje para residuos de papel y plástico. A través de la gestión de residuos, es posible obtener biogás que podría ser utilizado para la generación de electricidad.

El modelo matemático está formulado para un horizonte de tiempo de un año y podría ser aplicado a cualquier región considerando los datos apropiados.

Balance de agua en acuíferos

La disponibilidad de agua en acuíferos es igual a la recarga natural de agua en cada acuífero menos el agua extraída de pozos ($w_{a,w}^{a-w}$):

$$w_a^A = w_a^{\text{recharge}} - \sum_w w_{a,w}^{a-w}, \quad \forall a \quad (4.1)$$

El agua disponible en los acuíferos debe ser mayor que un nivel mínimo de agua en cada uno de los acuíferos.

$$w_a^A \geq W_a^{\min} \quad \forall a \quad (4.2)$$

Demanda de agua

El agua extraída de pozos (w_w^{well}) es igual al agua extraída de acuíferos ($w_{a,w}^{a-w}$), en este trabajo fue considerado que un pozo corresponde a la suma de todos los pozos existentes por municipio:

$$\sum_a w_{a,w}^{a-w} = w_w^{\text{well}} \quad \forall w \quad (4.3)$$

El agua proporcionada por pozos es distribuida a los sectores domestico ($w_{w,m}^{\text{well}-m}$), agrícola ($w_{w,m}^{\text{well}-agr}$), industrial ($w_{w,m}^{\text{well}-ind}$) y ganadero ($w_w^{\text{well}-lives}$), a las tecnologías de conversión de

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

residuos a energía ($w_w^{well-waste}$) y para la generación de electricidad ($w_w^{well-grid}$) en los municipios:

$$w_w^{well} = \sum_m w_{w,m}^{well-m} + w_w^{well-agr} + w_w^{well-ind} + w_w^{well-waste} + w_w^{well-lives} + w_w^{well-grid}, \quad \forall w \quad (4.4)$$

El agua proporcionada por pozos ($w_{w,m}^{well-m}$), presas ($w_{d,m}^{dam-m}$), y el agua tratada en las plantas de tratamiento de agua existentes ($w_i^{reclaimed-i}$) y nuevas ($w_j^{reclaimed-new}$) pueden ayudar a satisfacer la demanda de agua del sector doméstico (w_m^{dom}):

$$w_m^{dom} = \sum_w w_{w,m}^{well-m} + \sum_d w_{d,m}^{dam-m} + \sum_i w_i^{reclaimed-i} + \sum_j w_j^{reclaimed-new}, \quad \forall m \quad (4.5)$$

$$w_w^{domin} \leq w_m^{dom}, \quad \forall m \quad (4.6)$$

El agua destinada al sector agrícola es igual al agua extraída de pozos ($w_w^{well-agr}$) más el agua proveniente de presas ($w_d^{dam-agr}$):

$$w^{agr} = \sum_w w_w^{well-agr} + \sum_d w_d^{dam-agr} \quad (4.7)$$

El agua proporcionada de pozos ($w_w^{well-ind}$), presas ($w_d^{dam-ind}$), y el agua tratada ($w^{reclaimed-ind}$) pueden satisfacer la demanda de agua industrial:

$$w^{ind} = \sum_w w_w^{well-ind} + \sum_d w_d^{dam-ind} + w^{reclaimed-ind} \quad (4.8)$$

El agua residual de la industria es multiplicada por un factor que representa la eficiencia de una planta de tratamiento de agua ($\gamma^{ind-reclaimed}$) para calcular el agua que puede ser reusada en el sector industrial a partir del tratamiento de agua usada en la industria.

$$w^{reclaimed-ind} = w^{wwind} \cdot \gamma^{ind-reclaimed} \quad (4.9)$$

El agua requerida para el tratamiento de los residuos sólidos municipales generados en una región (w^{waste}) es igual a la suma de agua consumida para el manejo de los residuos sólidos

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

multiplicado por un factor (λ) que representa la relación entre las toneladas de residuos procesados y el agua utilizada para tal proceso:

$$w^{waste} = \sum_m \sum_r g_{r,m}^{recycle} \cdot \lambda_r^{w-rec} + g_{r,m}^{land} \cdot \lambda_r^{w-land} + g_{r,m}^{gas} \cdot \lambda_r^{w-gas} \quad (4.10)$$

El agua proporcionada por presas ($w_d^{dam-waste}$) puede cubrir los requerimientos de agua para el tratamiento de residuos sólidos:

$$w^{waste} = \sum_d w_d^{dam-waste} \quad (4.11)$$

Balance de agua en presas

El volumen de agua disponible en las presas es calculado como la recarga natural de agua

(w_d^{dam-nr}) menos el agua enviada al sector doméstico ($w_{d,m}^{dam-m}$), agrícola ($w_d^{dam-agr}$), ganadero ($w_d^{dam-lives}$) e industrial ($w_d^{dam-ind}$), así como el agua consumida para el tratamiento de los residuos sólidos municipales ($w_d^{dam-waste}$):

$$w_d^{dam} = w_d^{dam-nr} - \sum_m w_{d,m}^{dam-m} - w_d^{dam-agr} - w_d^{dam-ind} - w_d^{dam-waste} - w_d^{dam-grid} - w_d^{dam-lives}, \quad \forall d \quad (4.12)$$

La capacidad de las presas ($V_d^{dam-max}$) debe ser mayor que el agua disponible en la presa:

$$w_d^{dam} \leq V_d^{dam-max}, \quad \forall d \quad (4.13)$$

Además, la capacidad de la presa debe ser mayor que su nivel mínimo de capacidad

($V_d^{dam-min}$):

$$w_d^{dam} \geq V_d^{dam-min}, \quad \forall d \quad (4.14)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Tratamiento de agua

El agua tratada es igual al flujo de agua residual generado en el sector doméstico multiplicado por un factor que representa el agua que puede ser tratada (γ^{gwd}):

$$w_m^{reclaimed} = w_m^{dom} \cdot \gamma^{gwd}, \quad \forall m \quad (4.15)$$

El agua tratada total es igual a la suma del flujo de agua tratada en las plantas de tratamiento de agua existentes ($w_{m,i}^{gwex}$) y las plantas de tratamiento nuevas ($w_{m,j}^{gwnew}$):

$$w_m^{reclaimed} = \sum_i w_{m,i}^{gwex} + \sum_j w_{m,j}^{gwnew}, \quad \forall m \quad (4.16)$$

Plantas de tratamiento de agua existentes

El agua tratada en las plantas de tratamiento de agua existentes ($w_m^{reclaimed-i}$) es igual al agua residual que entra a la planta de tratamiento de agua multiplicada por un factor de eficiencia (γ^{gw}):

$$w_m^{reclaimed-i} = \sum_i w_{i,m}^{gwex} \cdot \gamma^{gw}, \quad \forall m \quad (4.17)$$

La capacidad de la planta de tratamiento de agua ($v_i^{treatment}$) requiere se mayor que el flujo de agua que entra a la planta:

$$v_i^{treatment} \geq \sum_m w_{i,m}^{gwex}, \quad \forall i \quad (4.18)$$

Además, la capacidad de la planta de tratamiento de agua debe ser menor que la capacidad máxima de la planta:

$$v_i^{treatment} \leq v_i^{gswmax}, \quad \forall i \quad (4.19)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Nuevas plantas de tratamiento de agua

El agua tratada en las plantas nuevas ($w_{m,j}^{reclaimednew}$) se calcula como el producto del factor de eficiencia de las plantas (γ^{gwnew}) y el flujo de agua que entra a la planta:

$$\sum_j w_{m,j}^{reclaimednew} = \sum_j w_{j,m}^{gwnew} \cdot \gamma^{gwnew}, \quad \forall m \quad (4.20)$$

La capacidad de las plantas de tratamiento de agua nuevas (v_j^{gw-new}) debe ser mayor que el agua de entrada a las plantas de trataiento e inferior a su capacidad máxima ($V_j^{gwnew-max}$):

$$v_j^{gw-new} \geq \sum_m w_{j,m}^{gwnew}, \quad \forall j \quad (4.21)$$

$$v_j^{gw-new} \leq V_j^{gwnew-max} \cdot \gamma_j^{gwnew}, \quad \forall j \quad (4.22)$$

Demanda de energía

Para cubrir los requerimientos energéticos se genera electricidad en parques solares (e_t^{solar}) y en centrales eléctricas convencionales (e_t^{grid}):

$$e^{solar} + e^{grid} = e^{dom} + e^{ind} + e^{agr} + e^{waste} \quad (4.23)$$

La suma de la electricidad generada en las centrales eléctricas (e_e^{grid-e}) es igual a la electricidad total producida en centrales eléctricas (e^{grid}):

$$e^{grid} = \sum_e e_e^{grid-e} \quad (4.24)$$

La capacidad de las centrales eléctricas (v_e^{grid}) debe ser mayor que la generación eléctrica en cada central:

$$e_e^{grid-e} \leq v_e^{grid}, \quad \forall e \quad (4.25)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

La capacidad debe ser inferior a su capacidad máxima:

$$V_e^{grid} \leq V_e^{grid-max}, \quad \forall e \quad (4.26)$$

La generación de electricidad en el parque solar debe ser inferior a su capacidad máxima

($V^{solar-max}$):

$$V^{solar-max} \geq e^{solar} \quad (4.27)$$

Es necesario cubrir la demanda de electricidad en los sectores doméstico, industrial y agrícola; para ello se fijan sus límites mínimo y máximo:

$$e^{dom-min} \leq e^{dom} \leq e^{dom-max} \quad (4.28)$$

$$e^{ind-min} \leq e^{ind} \leq e^{ind-max} \quad (4.29)$$

$$e^{agr-min} \leq e^{agr} \leq e^{agr-max} \quad (4.30)$$

La electricidad generada en centrales eléctricas está determinada por el tipo de combustible utilizado multiplicado por un factor (τ) que representa la relación entre la cantidad de combustible necesario para generar electricidad:

$$e_e^{grid-e} = f^{biogas-e} \cdot \tau_e^{biogas} + f^{biogasg-e} \cdot \tau_e^{biogasg} + f^{ng} \cdot \tau_e^{ng} + f^{biogasman-e} \cdot \tau_e^{biogasman}, \quad \forall e \quad (4.31)$$

La cantidad de combustible requerido (f^{fuel}) es igual a la compra de gas natural (f^{ng}) más el biogás producido en la planta de gasificación ($f^{biogasg-e}$), más el biogás captado en vertederos ($f^{biogas-e}$), más el biogás obtenido en la planta de digestión anaeróbica

($f^{biogasman-e}$):

$$f^{fuel} = f^{ng} + f^{biogas-e} + f^{biogasg-e} + f^{biogasman-e} \quad (4.32)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

La energía utilizada para el tratamiento de residuos sólidos (e^{waste}) es igual a un factor energético (λ^{e-}) multiplicado por la cantidad de residuos sólidos tratados en las plantas de procesamiento o plantas de reciclaje (g):

$$e^{waste} = \sum_m \sum_r g_{r,m}^{recycle} \cdot \lambda_r^{e-rec} + g_{r,m}^{land} \cdot \lambda_r^{e-land} + g_{r,m}^{gas} \cdot \lambda_r^{e-gas} \quad (4.33)$$

Agricultura

La cosecha de cada tipo de cultivo evaluado en este trabajo (cr_c^{agr}) está limitada por el área disponible (A^{agr}). De esta forma, el área utilizada para los usuarios agrícolas (a^{Tagr}) debe ser inferior al área máxima disponible (A^{agr}). Para determinar la cantidad de alimento cosechado, se multiplica el área de cada cultivo por un factor (ϕ_c^{a-agr}) que considera las toneladas de alimento producidas por área cosechada:

$$cr_c^{agr} = a_c^{agr} \cdot \phi_c^{a-agr}, \quad \forall c \quad (4.34)$$

$$a^{Tagr} = \sum_c a_c^{agr} \quad (4.35)$$

$$a^{Tagr} \leq A^{agr} \quad (4.36)$$

La producción de cultivos está limitada por la producción mínima y máxima:

$$cr_c^{agr-min} \leq cr_c^{agr} \leq cr_c^{agr-max}, \quad \forall c \quad (4.37)$$

Además, el agua requerida para la cosecha es igual al número de cultivos por un factor (ϕ_c^{w-agr}) que representa la cantidad de agua utilizada para cosechar una tonelada de cada cultivo:

$$w^{agr} = \sum_c cr_c^{agr} \cdot \phi_c^{w-agr} \quad (4.38)$$

Sector ganadero

Se evaluó la producción ganadera bovina y avícola. El número de cabezas en el sector pecuario ($head_l$) es igual a las cabezas de ganado vacuno y avícola destinadas al consumo

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

de carne ($head_l^{meat}$), más las cabezas de ganado destinadas a la producción de leche y huevos en el caso de las aves.

$$head_l = head_l^{meat} + head_l^{sub}, \quad \forall l \quad (4.39)$$

Los cabezas totales ($head_l$) se definen en base al número mínimo de cabezas que debe haber en la región menos el número máximo de cabezas:

$$head_l \geq head_l^{\min}, \quad \forall l \quad (4.40)$$

$$head_l \leq head_l^{\max}, \quad \forall l \quad (4.41)$$

La carne de res y de pollo ($meat_l^{lives}$) es igual a las cabezas de ganado vacuno y de aves por un factor que indica la cantidad de carne por cabeza ($\varphi_l^{p-lives}$):

$$meat_l^{lives} = head_l^{meat} \cdot \varphi_l^{p-lives} \quad \forall l \quad (4.42)$$

La producción de carne debe ser superior a la producción mínima ($meat_l^{lives-\min}$) de la región e inferior a su producción máxima ($meat_l^{lives-\max}$):

$$meat_l^{lives-\min} \leq meat_l^{lives} \leq meat_l^{lives-\max} \quad \forall l \quad (4.43)$$

Los productos de leche y huevo (sub_l^{lives}) se calculan como el número de cabezas por un factor que indica la cantidad de producto por cabeza ($\varphi_l^{sp-lives}$):

$$sub_l^{lives} = head_l^{sub} \cdot \varphi_l^{sp-lives} \quad \forall l \quad (4.44)$$

La producción de leche y huevos debe ser superior a la producción mínima ($sub_l^{lives-\min}$) de la región e inferior a la producción máxima ($sub_l^{lives-\max}$):

$$sub_l^{lives-\min} \leq sub_l^{lives} \leq sub_l^{lives-\max} \quad \forall l \quad (4.45)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

El agua utilizada para satisfacer las necesidades del sector ganadero (w^{lives}) es igual a la producción de carne de res, carne de pollo, leche y huevos multiplicada por su huella hídrica ($\varphi_l^{w-lives}$):

$$w^{lives} = \sum_l meat^{lives}_l \cdot \varphi_l^{w-lives} + sub^{lives}_l \cdot \varphi_l^{w-livesp} \quad (4.46)$$

Planta de digestión anaerobia

El estiércol generado por el ganado se calcula como el producto del número de cabezas de ganado por el estiércol generado por animal (φ_l^{manure}):

$$manure = \sum_l head_l \cdot \varphi_l^{manure} \quad (4.47)$$

El estiércol es igual a la suma del estiércol generado en los municipios donde está instalada una planta de digestión anaeróbica:

$$manure = \sum_k manure_k^{treat} \quad (4.48)$$

El biogás generado por el estiércol ($f^{biogasman}$) es igual al producto de la cantidad de estiércol tratado en la planta de digestión anaerobia, y el factor de producción de biogás por tonelada de estiércol tratado ($\varphi^{biogas-manure}$):

$$f^{biogasman} = \sum_k manure_k^{treat} \cdot \varphi^{biogas-manure} \quad (4.49)$$

El fertilizante producido por el tratamiento del estiércol ($f^{fert-man}$) es igual a las toneladas de estiércol tratadas por el factor de producción del fertilizante ($\varphi^{fert-manure}$):

$$f^{fert-man} = \sum_k manure_k^{treat} \cdot \varphi^{fert-manure} \quad (4.50)$$

La capacidad de la planta de digestión anaeróbica debe ser mayor que el estiércol tratado:

$$v_k^{ad} \geq manure_k^{treat}, \quad \forall k \quad (4.51)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Además, la capacidad de la planta (v_k^{ad}) debe ser inferior a la capacidad máxima:

$$v_k^{ad} \geq V_k^{ad-max}, \quad \forall k \quad (4.52)$$

El biogás generado podrá ser utilizado para la generación de electricidad ($f^{biogasman-e}$) o podrá ser vendido para su uso en otros sectores ($f^{biogasman-s}$):

$$f^{biogasman} = f^{biogasman-e} + f^{biogasman-s} \quad (4.53)$$

Residuos sólidos

Los residuos sólidos generados ($g_{r,m}$) pueden ser enviados a plantas de reciclaje ($g_{r=1,2,m}^{recycle}$), plantas de gasificación ($g_{r,m}^{gas}$) o rellenos sanitarios ($g_{r,m}^{land}$) para su disposición final:

$$g_{r,m} = g_{r=1,2,m}^{recycle} + g_{r,m}^{land} + g_{r,m}^{gas}, \quad \forall r, \forall m \quad (4.54)$$

Los residuos de papel y plástico generados en los municipios ($g_{r=1,2,m}^{recycle}$) pueden ser enviados a plantas de reciclaje ubicadas en diferentes municipios ($g_{r,m,n}^{recn}$):

$$g_{r=1,2,m}^{recycle} = \sum_n g_{r,m,n}^{recn}, \quad \forall r, \forall m \quad (4.55)$$

El papel y plástico recuperados es igual al total de residuos multiplicado por la eficiencia de la planta de reciclaje (ζ_r^{rec}):

$$g_{r,m}^{rec-reclaimed} = \sum_n g_{r,m,n}^{recn} \cdot \zeta_r^{rec}, \quad \forall r, \forall m \quad (4.56)$$

La existencia de la planta de reciclaje está determinada por su capacidad (v_r^{rec}), la cual debe ser suficiente para el tratamiento de residuos:

$$v_{r,n}^{rec} \leq g_{r,n}^{rec-reclaimed}, \quad \forall r, \forall n \quad (4.57)$$

$$v_{r,n}^{rec} \leq V_{r,n}^{rec-max} \cdot y_{r,n}^{rec}, \quad \forall r, \forall n \quad (4.58)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Los MSW generados en los municipios ($g_{r,m}^{land}$) pueden ser enviados a rellenos sanitarios ubicados en los diferentes municipios ($g_{r,m,n}^{landn}$):

$$g_{r,m}^{land} = \sum_n g_{r,m,n}^{landn}, \quad \forall r, \forall m \quad (4.59)$$

La cantidad de biogás capturado en el relleno sanitario (f_t^{biogas}) es igual a los residuos sólidos tratados multiplicado por un factor que representa la cantidad de biogás que se genera por tonelada de residuos sólidos (σ^{gas}):

$$f^{biogas} = \sum_n \sum_m \sum_r g_{r,m,n}^{landn} \cdot \sigma^{gas} \quad (4.60)$$

La capacidad del vertedero (v_n^{land}) debe ser mayor a los MSW que serán tratados, y debe ser menor a la capacidad máxima:

$$v_n^{land} \leq \sum_m \sum_r g_{r,m,n}^{landn}, \quad \forall n \quad (4.61)$$

$$v_n^{land} \leq V_n^{land-max} \cdot y_n^{land}, \quad \forall n \quad (4.62)$$

Además, el biogás se puede utilizar para satisfacer los requerimientos energéticos ($f^{biogas-e}$) o se puede vender a otras industrias ($f^{biogas-v}$):

$$f^{biogas} = f^{biogas-e} + f^{biogas-s} \quad (4.63)$$

Otra alternativa para el tratamiento de residuos sólidos es la planta de gasificación, en este proceso se obtiene biogás ($f^{biogasg}$), el cual se puede calcular multiplicando la cantidad de residuos sólidos que ingresan a la planta ($g_{r,m,n}^{gasn}$) por un factor que indica la cantidad de biogás obtenido por unidad de residuo sólido (ζ^{gas}):

$$g_{r,m}^{gas} = \sum_n g_{r,m,n}^{gasn}, \quad \forall r, \forall m \quad (4.64)$$

$$f^{biogasg} = \sum_n \sum_m \sum_r g_{r,m,n}^{gasn} \cdot \zeta^{gasification} \quad (4.65)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

La capacidad máxima disponible para la instalación de una planta de gasificación ($V^{\text{gas-max}}$) debe ser mayor a la capacidad seleccionada por el modelo (v^{gas}). Además, la capacidad de la planta de gasificación debe ser suficiente para el tratamiento de residuos sólidos:

$$v_n^{\text{gas}} \leq \sum_m \sum_r g_{r,m,n}^{\text{gasn}}, \forall n \quad (4.66)$$

$$v_n^{\text{gas}} \leq V_n^{\text{gas-max}} \cdot y_n^{\text{gas}}, \forall n \quad (4.67)$$

El biogás se puede utilizar para satisfacer los requerimientos energéticos ($f^{\text{biogasg-e}}$) o se puede vender a otras industrias ($f^{\text{biogasg-v}}$):

$$f^{\text{biogasg}} = f^{\text{biogasg-e}} + f^{\text{biogasg-s}} \quad (4.68)$$

Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones generadas en los vertederos y la planta de gasificación se calculan en base a los residuos sólidos tratados multiplicado por su factor de emisión (μ):

$$emissions^{\text{land}} = \sum_n \sum_m \sum_r g_{r,m,n}^{\text{landn}} \cdot \mu^{\text{land}} \quad (4.69)$$

$$emissions^{\text{gas}} = \sum_n \sum_m \sum_r g_{r,m,n}^{\text{gasn}} \cdot \mu^{\text{gas}} \quad (4.70)$$

$$emissions^{\text{rec}} = \sum_r \sum_m \sum_n g_{r,m,n}^{\text{recn}} \cdot \mu_r^{\text{rec}} \quad (4.71)$$

Las emisiones generadas por el transporte son iguales a la cantidad de residuos sólidos municipales enviados a las tecnologías WtE multiplicado por el factor de emisión que representa las emisiones generadas por distancia ($\mu_{m,n}^{\text{distance}}$):

$$emissions^{\text{transport}} = \sum_r \sum_m \sum_n (g_{r,m,n}^{\text{recn}} + g_{r,m,n}^{\text{gasn}} + g_{r,m,n}^{\text{landn}}) \cdot \mu_{m,n}^{\text{distance}} \quad (4.72)$$

Las emisiones generadas en el sector ganadero son iguales a los productos de origen animal multiplicados por su factor de emisión:

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

$$emissions^{lives} = \sum_l meat_l^{lives} \cdot \mu_l^{meatemissions} + \sum_l sub_l^{lives} \cdot \mu_l^{subemissions} \quad (4.73)$$

Las emisiones generadas en el sector agrícola son iguales a la producción del cultivo por su factor de emisión ($\mu^{agremissions}$):

$$emissions^{agr} = \sum_c cr_c^{agr} \cdot \mu_c^{agremissions} \quad (4.74)$$

Las emisiones asociadas a la generación de energía son iguales a la cantidad de cada tipo de combustible por un factor que indica las emisiones generadas por unidad de combustible utilizada (μ):

$$emissions^{energy} = \mu^{ng} \cdot f^{ng} + \mu^{biogasg} \cdot f^{biogasg} + \mu^{biogas} \cdot f^{biogas} + \mu^{biogasman} \cdot f^{biogasman} \quad (4.75)$$

Costos de capital

Los costos de capital ($ccost$) se calculan multiplicando el Costo Fijo unitario (FC) asociado a cada unidad por su variable binaria (y) que determina la existencia de la tecnología, más el Costo Variable unitario (VC) por la capacidad de cada unidad (v):

$$ccost^{gw} = \sum_j FC^{gw} \cdot y_j^{gwnew} + VC^{gw} \cdot v_j^{treatment} \quad (4.76)$$

$$ccost^{ad} = \sum_k FC_k^{ad} \cdot y_k^{ad} + VC_k^{ad} \cdot v_k^{ad} \quad (4.77)$$

$$ccost^{gas} = \sum_n FC_n^{gas} \cdot y_n^{gas} + VC_n^{gas} \cdot v_n^{gas} \quad (4.78)$$

$$ccost^{rec} = \sum_r \sum_n FC_r^{rec} \cdot y_{r,n}^{rec} + VC_r^{rec} \cdot v_{r,n}^{rec} \quad (4.79)$$

$$ccost^{land} = \sum_m FC_m^{land} \cdot y_m^{land} + VC_m^{land} \cdot a_m^{land} \quad (4.80)$$

Los Costos de Capital (CC) son iguales al factor de anualización multiplicado (k_F) por la suma de todos los costos de capital:

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

$$CC = k_F \cdot (ccost^{gw} + ccost^{ad} + ccost^{gas} + ccost^{rec} + ccost^{land}) \quad (4.81)$$

El factor de anualización (k_F) para anualizar el costo invertido de las tecnologías se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$k_F = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.82)$$

Donde i es la tasa de interés (10%) y n corresponde al período de vida del proyecto (supuesto de 10 años).

Costos de operación

Los costos de operación son iguales a los costos de operación de las unidades y el costo de operación en los sectores:

$$\begin{aligned} OC = & ocost^{ng} + ocost^{water} + ocost^{land} \\ & + ocost^{gas} + ocost^{rec} + ocost^{transport} \\ & + ocost^{ad} + ocost^{agr} + ocost^{lives} \end{aligned} \quad (4.83)$$

Gas Natural

El valor económico del gas natural consumido es igual al flujo de combustible multiplicado por el costo unitario del combustible (ψ^{ng}):

$$ocost^{ng} = \psi^{ng} \cdot f^{ng} \quad (4.84)$$

Agua

El costo operativo del agua es igual al caudal de agua total consumido multiplicado por el factor que representa el costo operativo unitario (ψ^{water}):

$$ocost^{water} = WATER \cdot \psi^{water} \quad (4.85)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Tratamiento de residuos sólidos

Los costos de operación de las unidades se calcularon en base a la cantidad de residuos sólidos manejados multiplicada por un parámetro (ψ) que representa el costo de operación de cada unidad de tratamiento de residuos sólidos:

$$ocost^{gas} = \sum_r \sum_m \sum_n g_{r,m,n}^{gasn} \cdot \psi^{gas} \quad (4.86)$$

$$ocost^{land} = \sum_r \sum_m \sum_n g_{r,m,n}^{landn} \cdot \psi^{land} \quad (4.87)$$

$$ocost^{ad} = \sum_n manure_k^{treat} \cdot \psi^{ad} \quad (88)$$

Los residuos sólidos municipales tratados multiplicados por el costo de transporte es igual al costo de transporte operativo ($\psi_{m,n}^{distance}$):

$$ocost^{transport} = \sum_r \sum_m \sum_n g_{r,m,n}^{recn} + g_{r,m,n}^{gasn} + g_{r,m,n}^{landn} \cdot \psi_{m,n}^{distance} \quad (4.89)$$

Reciclaje

El costo de reciclaje es igual al costo unitario de reciclaje (ψ_r^{rec}) multiplicado por la cantidad de residuos sólidos manejados:

$$ocost^{rec} = \sum_r \sum_m \sum_n g_{r,m,n}^{recn} \cdot \psi_r^{rec} \quad (4.90)$$

Agricultura

Los costos de operación en el sector agrícola son iguales a los cultivos producidos multiplicados por su costo de producción:

$$ocost^{agr} = \sum_c cr_c^{agr} \cdot \psi_c^{agr} \quad (4.91)$$

Ganadería

El costo de operación en el sector ganadero es igual a los alimentos producidos multiplicado por su costo de producción:

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

$$ocost^{lives} = \sum_l meat_l^{lives} \cdot \psi_l^{meatlives} + \sum_l sub_l^{lives} \cdot \psi_l^{sublives} \quad (4.92)$$

Ventas

Las ventas totales son iguales a la suma de las ventas de agua, electricidad, material reciclado y biocombustibles:

$$SLS = ven^e + ven^w + ven^f + ven^{rec} + ven^{fert} + ven^{meat} + ven^{sub} + ven^{crop} \quad (4.93)$$

Ventas de Electricidad

Las ventas de electricidad son iguales a la electricidad generada por el costo unitario por venta de energía (ψ^e):

$$ven^e = \psi^e \cdot (e^{grid} + e^{solar}) \quad (4.94)$$

Ventas de agua

Las ventas de agua se pueden calcular multiplicando el costo unitario de venta de agua por la cantidad de agua vendida:

$$ven^w = \psi^{dom} \cdot \sum_m w_m^{dom} + \psi^{agr} \cdot w^{agr} + \psi^{ind} \cdot w^{ind} \quad (4.95)$$

Ventas de biocombustible

Las ventas de biocombustibles son iguales a la cantidad de combustible vendido por el costo unitario de venta del biocombustible (ψ):

$$ven^f = \psi^{biogasg} \cdot f^{biogasg-s} + \psi^{biogas} \cdot f^{biogas-s} + \psi^{biogasman} \cdot f^{biogasman-s} \quad (4.96)$$

Ventas de residuos sólidos

Las ventas de material reciclado son iguales a la cantidad de combustible vendido por el costo unitario de venta de material reciclado:

$$ven^{rec} = \sum_r \sum_m \sum_n g_{r,m,n}^{recn} \cdot \psi_r^{rec-sale} \quad (4.97)$$

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Fertilizante

Las ventas de fertilizantes se calculan como el producto de la cantidad de fertilizante producido y el costo unitario de venta:

$$ven^{fert} = \psi^{fert} \cdot f^{fert} \quad (4.98)$$

Alimentos

Las ventas que obtienen los alimentos como la carne ($meat_l^{lives}$) producidos en las actividades pecuarias, así como la leche y los huevos (sub_l^{lives}) se calculan por la cantidad de alimentos producidos por su costo unitario de venta (ψ):

$$ven^{meat} = \sum_l meat_l^{lives} \cdot \psi_l^{meat} \quad (4.99)$$

$$ven^{sub} = \sum_l sub_l^{lives} \cdot \psi_l^{sub} \quad (4.100)$$

Las ventas de la producción de cultivos son iguales a las toneladas de cultivos producidos multiplicadas por el costo unitario de venta de cada tipo de cultivo:

$$ven^{crop} = \sum_c cr_c^{agr} \cdot \psi^{crop} \quad (4.101)$$

Costo total anual

El costo se calcula como la suma de todos los costos de capital y los costos operativos de los sistemas seleccionados por el modelo (por ejemplo, plantas de tratamiento de aguas residuales, WtE) menos las ventas, que involucran las ventas de agua, energía, alimentos o biocombustibles:

$$COSTO = CC + OP - SLS \quad (4.102)$$

Emisiones de gases de efecto invernadero

Las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GHGE) corresponden a uno de los objetivos ambientales considerados en este problema. Los GHGE son iguales a la suma de las

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

emisiones generadas en el vertedero, gasificación de biogás, en la producción de energía, en las plantas de reciclaje, en el transporte de MSW, y en los sectores agrícola y ganadero:

$$GHGE = emissions^{land} + emissions^{gas} + emissions^{energy} + emissions^{rec} + emissions^{transport} + emissions^{lives} + emissions^{agr} \quad (4.103)$$

Agua fresca

El consumo de agua fresca es un objetivo ambiental de especial interés en regiones con baja accesibilidad a los recursos hídricos. El consumo de agua se calcula como la suma del agua extraída de pozos y presas para el abastecimiento de agua en los diferentes sectores de la región:

$$AGUA = \sum_w w_w^{well} + \sum_m \sum_d w_{d,m}^{dam-m} + w_d^{dam-agr} + w_d^{dam-ind} + w_d^{dam-waste} + w_d^{dam-lives} + w_d^{dam-grid} \quad (4.104)$$

Función objetivo

La función objetivo para el problema de Optimización Multiobjetivo consiste en la minimización simultánea de los costos, agua extraída y emisiones:

$$FO = \min \{ COSTO, AGUA, GHGE \} \quad (4.105)$$

4.2.3 Caso de estudio

La Región Lagunera (La Laguna) es una región árida ubicada en el norte de México, perteneciente a los estados de Coahuila y Durango (**Figura 4.2**), la zona metropolitana de La Laguna se ha convertido en núcleo de los procesos sociales y económicos del país. La población ha dotado a la región de una identidad propia a través del ejercicio de actividades económicas como la agricultura, la ganadería y la agroindustria. Todos ellos han generado campos económicos dinámicos interconectados y han construido un conglomerado de complejas relaciones regionales que se extienden a otros espacios nacionales y globales. En los últimos años, La Laguna ha sufrido sequías hidrológicas que con el tiempo se han vuelto apremiantes en diferentes sectores del país, como el industrial y el energético.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

La Laguna está conformada por 5 municipios del estado de Coahuila y 11 municipios del estado de Durango. Además, cuenta con 10 acuíferos, de los cuales 5 están sobreexplotados. Esto ha afectado la seguridad energética y alimentaria, por lo que la implementación de estrategias que permitan disminuir la explotación de los recursos ante condiciones climáticas severas es una prioridad para la seguridad del nexo WEF.

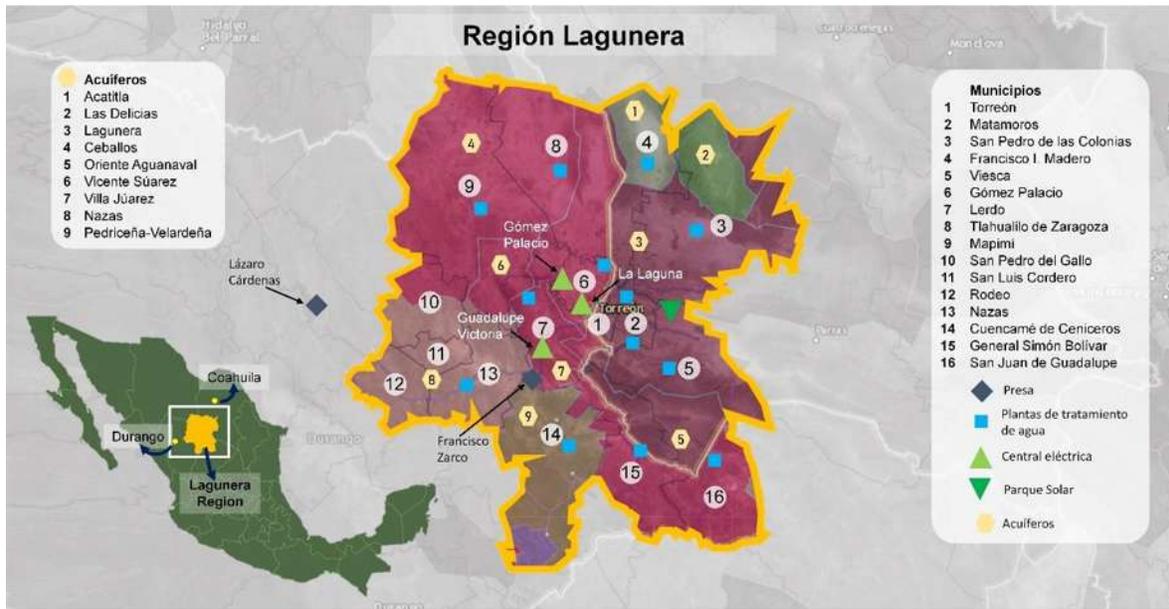


Figura 4. 2 Comarca Lagunera.

La **Figura 4.2** muestra la existencia actual de tecnologías para el manejo de los recursos de la región Lagunera. El abastecimiento de agua es uno de los principales problemas que enfrenta la región. Las actividades agrícolas, industriales y domésticas usan las aguas captadas de las presas “Lázaro Cárdenas” y “Francisco Zarco”, así como las aguas subterráneas. Sin embargo, debido a la sobreexplotación de algunos acuíferos, se han implementado algunas plantas de tratamiento de aguas residuales. Además, la Región Lagunera cuenta con tres centrales eléctricas y el parque solar “Villanueva” para satisfacer la demanda energética. El objetivo de este estudio es evaluar la situación de la región Lagunera y diseñar un sistema en el que se lleve a cabo la gestión adecuada de los recursos para la sostenibilidad del nexo WEF.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

4.3 Discusión de resultados

El modelo matemático propuesto corresponde a un Problema de Programación Mixto Entero Lineal (MINLP) y fue implementado en el software GAMS y resuelto utilizando el solver CPLEX (Brooke et al., 1998). El modelo consta de 2,083 restricciones, 57 variables binarias y 5,336 variables continuas y se resolvió atendiendo objetivos económicos y ambientales. Se optimizaron tres escenarios de optimización mono-objetivo, los cuales corresponden a la minimización del Costo (*Min Costo*), minimización del consumo de agua fresca (*Min Agua*) y minimización de emisiones de gases de efecto invernadero (*Min GHGE*). La **Figura 4.3** muestra los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados.

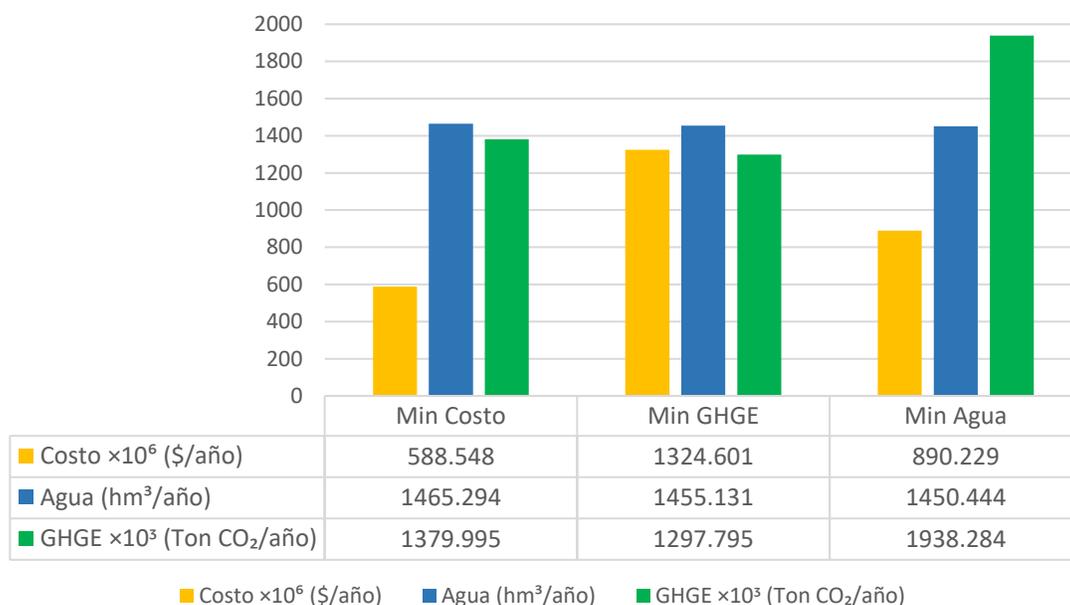


Figura 4. 3. Resultados obtenidos de los escenarios evaluados.

Como se puede observar, el objetivo referente al *AGUA* es el objetivo que presenta menor cambio entre los escenarios evaluados, esto se puede atribuir a que en el modelo la demanda de agua en los sectores agropecuario está en función de la producción de cultivos y alimentos de origen animal, que a su vez están delimitados por una producción mínima y máxima. Así

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

mismo, las demandas en los sectores doméstico e industrial son parámetros asignados al modelo. Por ello, el objetivo *AGUA* es el objetivo con menor cambio entre los diferentes escenarios, depende de la producción de alimentos o productos de valor agregado generados, así como del uso de agua tratada para su reúso la cual no cambia significativamente entre los escenarios. El escenario con mayor extracción de agua es el escenario *Min Costo*, que representa alrededor de un 1% más de extracción que el escenario *Min Agua*.

En el caso del objetivo GHGE, la mayor generación de emisiones se presentó en el escenario *Min Agua* (49% mayor que el escenario *Min GHGE*), en este escenario los rellenos sanitarios fueron las tecnologías de conversión de residuos a energía (WtE) con mayor generación de emisiones (**Tabla 4.1**). Por otro lado, el escenario *Min GHGE* selecciona diferentes tecnologías WtE para la gestión de los residuos sólidos municipales (MSW).

Tabla 4. 1 Generación de emisiones en las tecnologías de conversión de residuos a energía.

	GHGE $\times 10^3$ (Ton CO ₂)		
	Min Costo	Min GHGE	Min Agua
Relleno sanitario	76,543	58,809	96,741
Gasificación	6,742	12,301	-

En cuanto al objetivo económico *COSTO*, existe una gran variación entre los escenarios *Min Costo* y *Min GHGE*, este último es dos veces mayor que el escenario *Min Costo*, esta variación está dada principalmente por los costos de los equipos para las configuraciones (**Tabla 4.2**). Los vertederos son la tecnología más cara para la gestión de los MSW. Además, en el escenario de *Min Costo*, se generaron más productos de valor agregado para aumentar las ventas totales y, en consecuencia, aumentar la utilidad del sistema.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Tabla 4. 2 Costos del sistema en los diferentes escenarios.

	Min Costo	Min GHGE	Min Agua
Costo de Capital (MMUSD)	725.003	1432.1	964.04
Planta de tratamiento de agua	120.000	192.000	192.000
Gasificación	18.020	30.038	-
Relleno sanitario	4,320.000	8640	5760
Reciclaje	-	15.339	-
Digestión anaeróbica	73.25	-	73.25
Costo de operación (MMUSD)	505.284	495.86	527.34
Gasificación	0.020	0.037	-
Relleno sanitario	8.670	6.549	10.958
Reciclaje	-	1.806	-
Digestión anaeróbica	8.25	8.25	8.25
Gas Natural	108.071	96.347	88.556
Agua	366.324	363.783	362.611
Ganadería	9.043	8.557	8.557
Agricultura	2.154	2.135	2.135
Ventas (MMUSD)	641.739	603.36	601.151
Combustible	33.991	-	-
Productos reciclados	-	1.614	-
Alimentos	82.561	78.418	78.418
Fertilizante	5.189	5.189	5.189
Agua	390.357	388.655	388.655
Energía	129.641	128.933	128.890

Los resultados obtenidos en los escenarios de demanda energética en los diferentes sectores indican que el sector doméstico y el industrial son los de mayor consumo energético (**Tabla 4.3**). En el caso del consumo de agua, el sector que presenta un mayor consumo de agua es el agrícola, seguido del energético.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Tabla 4. 3 Requerimientos de energía y agua en diferentes sectores.

Energía (GWh/año)			
Sector/actividad	Min Costo	Min GHGE	Min Agua
Doméstico	3,565.9	3,565.9	3,565.9
Agrícola	71.3	71.3	71.3
Industrial	3,209.3	3,209.3	3,209.3
Manejo de residuos	26.5	45.2	4.609
Tratamiento de agua	395.63	392.885	391.62
Agua (hm³/año)			
Sector/actividad	Min Costo	Min GHGE	Min Agua
Agrícola	593.114	589.566	589.566
Ganadero	303.729	298.361	298.361
Energía	476.865	471.241	470.899
Doméstico	221.981	221.981	221.981
Industrial	44.396	44.396	44.396
Residuos sólidos	0.154	0.147	0.161

El consumo de agua en el sector agrícola depende de los principales cultivos producidos en la región, dicha producción no varía significativamente entre los diferentes escenarios (**Tabla 4.4**). El maíz es el cultivo de mayor producción en la región Lagunera; es importante mencionar que la región Lagunera es líder en producción de melón en el país.

Tabla 4. 4 Producción de cultivos en los escenarios evaluados.

Cultivo (Ton)	Min Costo	Min GHGE	Min Agua
Maíz	9,672.637	9,604.00	9,604.00
Avena	640	640.00	640.00
Melón	1,462.56	1,329.00	1,329.00
Manzana	60	60.00	60.00
Jitomate	172	172.00	172.00
Cebolla	53.68	48.00	48.00
Frijol	7415	7,415.00	7,415.00

En el sector ganadero se determinó el uso del agua para la producción óptima de ganado vacuno y avícola. La **Tabla 4.5** presenta la producción de carne de res, carne de pollo, leche y huevo para cada uno de los escenarios. Los resultados muestran que la producción de carne vacuna en el escenario *Min Costo* es mayor que en los demás escenarios, por lo que la venta

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

de carne aumenta las utilidades del sistema. La producción de leche, huevo y carne de pollo es similar entre los escenarios evaluados.

Tabla 4. 5 Productos del sector ganadero para los escenarios evaluados.

Producto	Min Costo	Min GHGE	Min Agua
Carne de res (Ton)	90,696	82,451	82,451
Pollo (Ton)	383,420	383,420	383,420
Leche(hm ³)	5.205	5.205	5.205
Huevo (Ton)	91,590	91,590	91,590

Escenario de mínimo costo (*Min Costo*)

El diagrama de flujo para la solución del escenario *Min Costo* se presenta en la **Figura 4.4**. Como se puede ver en la **Figura 4.4**, en algunos de estos municipios, las plantas de tratamiento de aguas residuales están operando actualmente; sin embargo, es indispensable realizar una mejor gestión del agua para evitar la sobreexplotación de este recurso. Por lo tanto, se requiere la instalación de nuevas plantas de tratamiento. Los resultados muestran que para la mayoría de los municipios es necesaria la instalación de nuevas plantas de tratamiento de aguas. El sector agrícola es la actividad con mayor consumo de agua en la región. La demanda de agua para fines agrícolas es cubierta con agua proveniente de pozos y presas. La **Tabla 4.6** muestra la distribución del agua de pozos hacia el sector doméstico y agrícola, los resultados indican que la mayor parte del agua extraída se destina a usuarios agrícolas.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Tabla 4. 6 Extracción de agua de pozos hacia los diferentes sectores.

Min Costo					
Municipio	Pozo (hm³)	Agrícola (hm³)	Doméstico (hm³)	Industrial (hm³)	Ganadero (hm³)
1	502.62	424.557	50.419	20.105	7.539
2	1.511	1.277	0.151	0.060	0.023
3	1.472	1.244	0.147	0.059	0.022
4	0.809	0.162	0.603	0.032	0.012
5	0.299	0.060	0.223	0.012	0.004
6	4.748	0.950	3.537	0.190	0.071
7	48.96	41.371	4.896	1.958	0.734
8	0.318	0.268	0.032	0.013	0.005
9	0.368	0.311	0.037	0.015	0.006
10	0.020	0.017	0.002	0.000	0.000
11	0.029	0.024	0.003	0.001	0.000
12	0.188	0.159	0.019	0.008	0.003
13	0.180	0.152	0.018	0.007	0.003
14	0.491	0.415	0.049	0.020	0.007
15	0.140	0.028	0.104	0.006	0.002
16	0.077	0.015	0.057	0.003	0.001

En el caso de la gestión de residuos sólidos, las tecnologías WtE seleccionadas fueron vertederos para capturar el biogás generado y utilizarlo como biocombustible. Las ubicaciones seleccionadas para estos vertederos fueron los municipios *1 Torreón, 6 Gómez Palacio y 7 Lerdo*. También se seleccionaron plantas de gasificación en los municipios *1 Torreón, 2 Matamoros y 3 San Pedro de las Colonias* para la producción de biogás. Debido a que la región Lagunera es líder en actividades ganaderas, los resultados indican que es conveniente instalar plantas de digestión anaeróbica para tratar el estiércol vacuno y así generar biogás y fertilizantes. Sin embargo, si bien es posible obtener biogás a través de tecnologías WtE para satisfacer los requerimientos energéticos de las centrales eléctricas, el sistema requiere la compra externa de gas natural.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

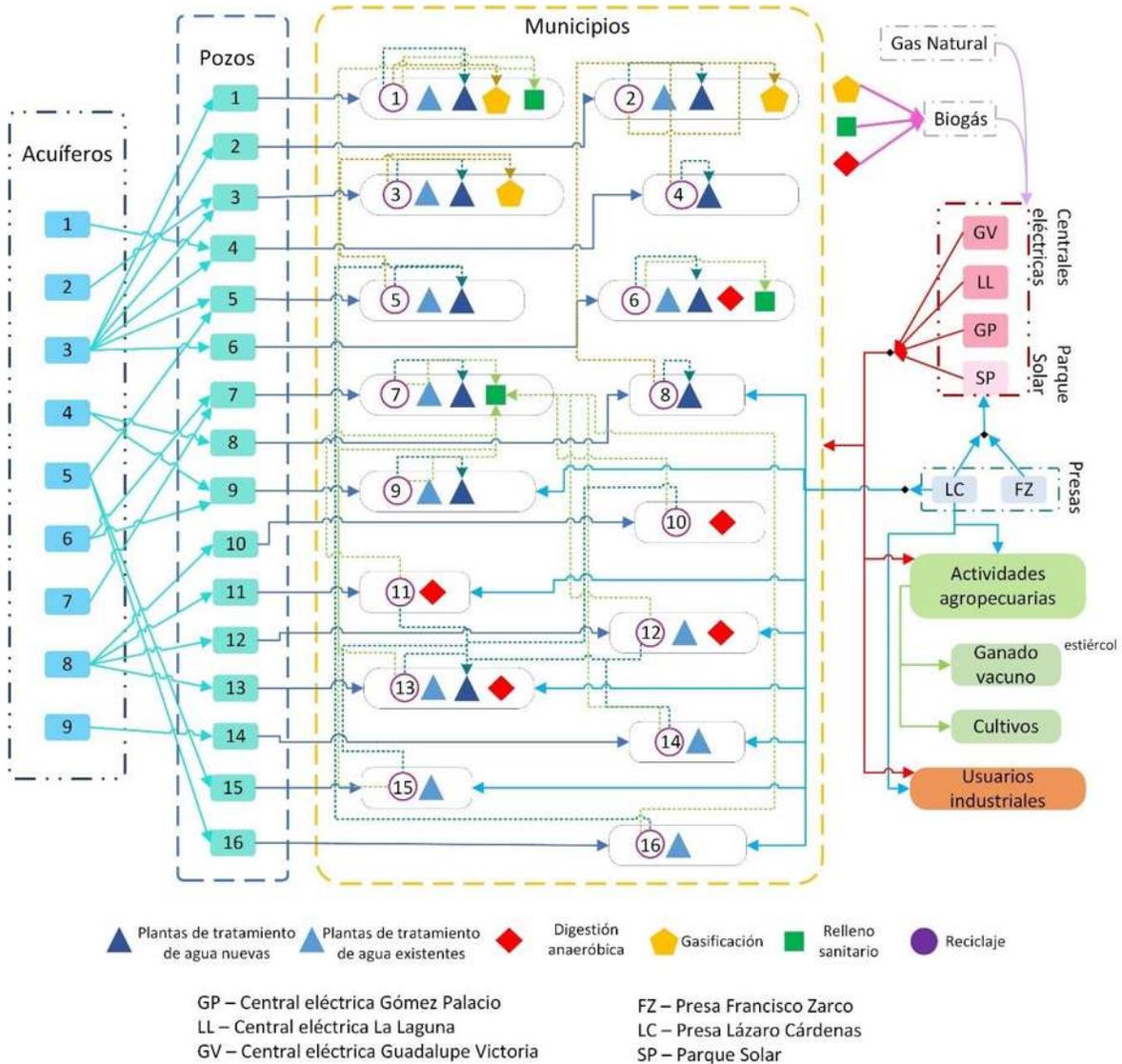


Figura 4. 4 Diagrama de flujo del escenario correspondiente a la minimización de los costos.

Escenario de mínimo consumo de agua (*Min Agua*)

En el caso del escenario *Min Agua* (Figura 4.5), para disminuir la extracción de agua de fuentes naturales se necesita la instalación de nuevas plantas de tratamiento de agua en los municipios. El modelo selecciona la instalación de nuevas plantas de tratamiento de agua en todos los municipios. En este escenario, las presas Francisco Zarco (FZ) y Lázaro Cárdenas

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

(LC) aportan agua para atender las demandas hídricas de los sectores. La presa Lázaro Cárdenas tiene la mayor influencia en el abastecimiento de los sectores.

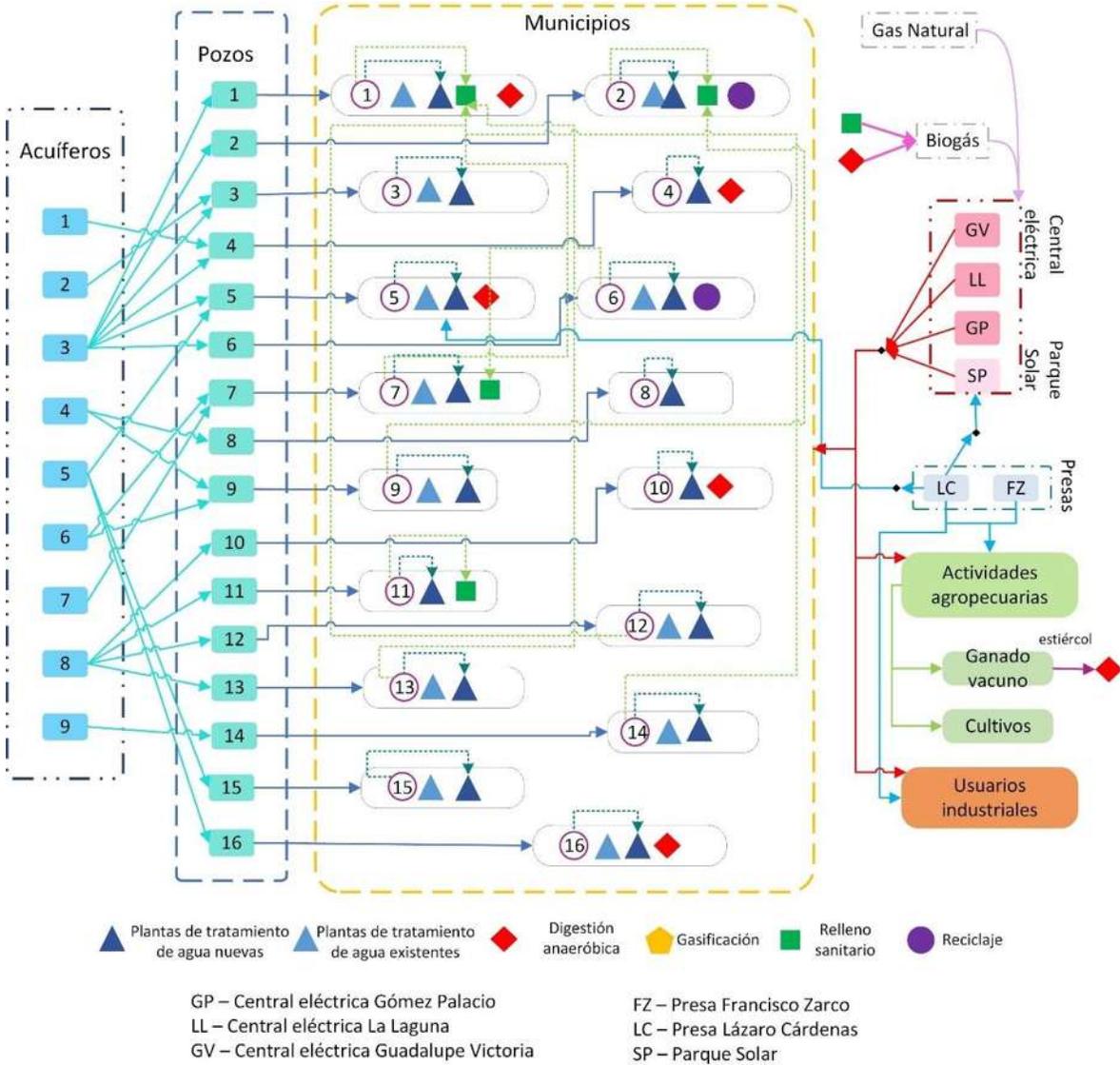


Figura 4. 5 Diagrama de flujo del escenario correspondiente a la minimización del consumo de agua.

La gestión de los MSW en este escenario se realiza mediante la instalación de diversas tecnologías WtE, esto incluye la instalación de vertederos, plantas de reciclaje y digestión anaeróbica para la producción de biogás y productos reciclados. El diagrama de flujo para este escenario muestra los vertederos como la principal tecnología WtE para la gestión de MSW, donde los residuos orgánicos, papel y plástico son tratados para la producción de

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

biogás. Además, se seleccionaron plantas de reciclaje de papel y plástico en los municipios de *2 Matamoros* y *6 Gómez Palacio*. También se seleccionaron plantas de digestión anaeróbica para el tratamiento del estiércol. Para satisfacer los requerimientos energéticos de los combustibles en la región, los combustibles utilizados en las centrales fueron el biogás generado en las plantas WtE y gas natural.

Si bien en este escenario se presenta el menos consumo de agua, de igual forma se presenta la mayor generación de emisiones, esto puede atribuirse a la selección de rellenos sanitarios como tecnología WtE, la cual se ha caracterizado por tener un mayor impacto ambiental. Además, los rellenos sanitarios son las tecnologías WtE más caras en comparación con las plantas de gasificación y digestión anaerobia, la instalación de vertederos en la mayoría de los municipios incrementa los costos en la configuración de este sistema.

Escenario de mínima generación de emisiones

La configuración de tecnologías para este escenario se presenta en la **Figura 4.6**. La gestión del agua requiere la instalación de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales para cubrir la demanda en todos los municipios de la Región Lagunera.

En los municipios de mayor población y cantidad de residuos sólidos urbanos se requiere la instalación de diversos tipos de tecnologías, como los municipios *1 Torreón* y *6 Gómez Palacio*. El diagrama de flujo correspondiente al diseño del sistema en este escenario indica que se seleccionan las plantas de gasificación para los municipios *1 Torreón*, *2 Matamoros*, *3 San Pedro de las Colonias*, *6 Gómez Palacio* y *7 Lerdo*. En el caso de los rellenos sanitarios, se seleccionaron en los municipios *1 Torreón*, *4 Francisco I. Madero*, *6 Gómez Palacio*, *8 Tlahualilo de Zaragoza*, *11 San Luis Cordero*, *14 Cuencamé de Ceniceros* y *16 San Juan de Guadalupe*. Además, en este escenario se seleccionaron plantas de reciclaje de papel y plástico en los municipios *1 Torreón*, *6 Gómez Palacio*, *9 Mapími* y *12 Rodeo*. La **Tabla 4.7** muestra la distribución de MSW a las tecnologías WtE implementadas en cada escenario.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Tabla 4. 7. Distribución de los residuos sólidos municipales a las tecnologías de conversión a energía.

MSW (Ton)	Min Costo			Min GHGE			Min Agua
	Gasificación	Vertedero	Reciclaje	Gasificación	Vertedero	Reciclaje	Vertedero
Orgánico	33,818.1121	18,5167.291	-	851,410.002	167,575.4	-	218,985.402
Papel	7,496.881	50,348.318	-	45,049.026	11,240.6187	1,555.556	57,845.199
Plástico	25,965.404	19,484.391	-	26,316.973	16,926.837	2,205.986	45,449.795

Uno de los sectores con mayor generación de gases de efecto invernadero es el sector ganadero. Por ello, para reducir la generación de emisiones, se seleccionó la instalación de plantas de digestión anaeróbica en los municipios.

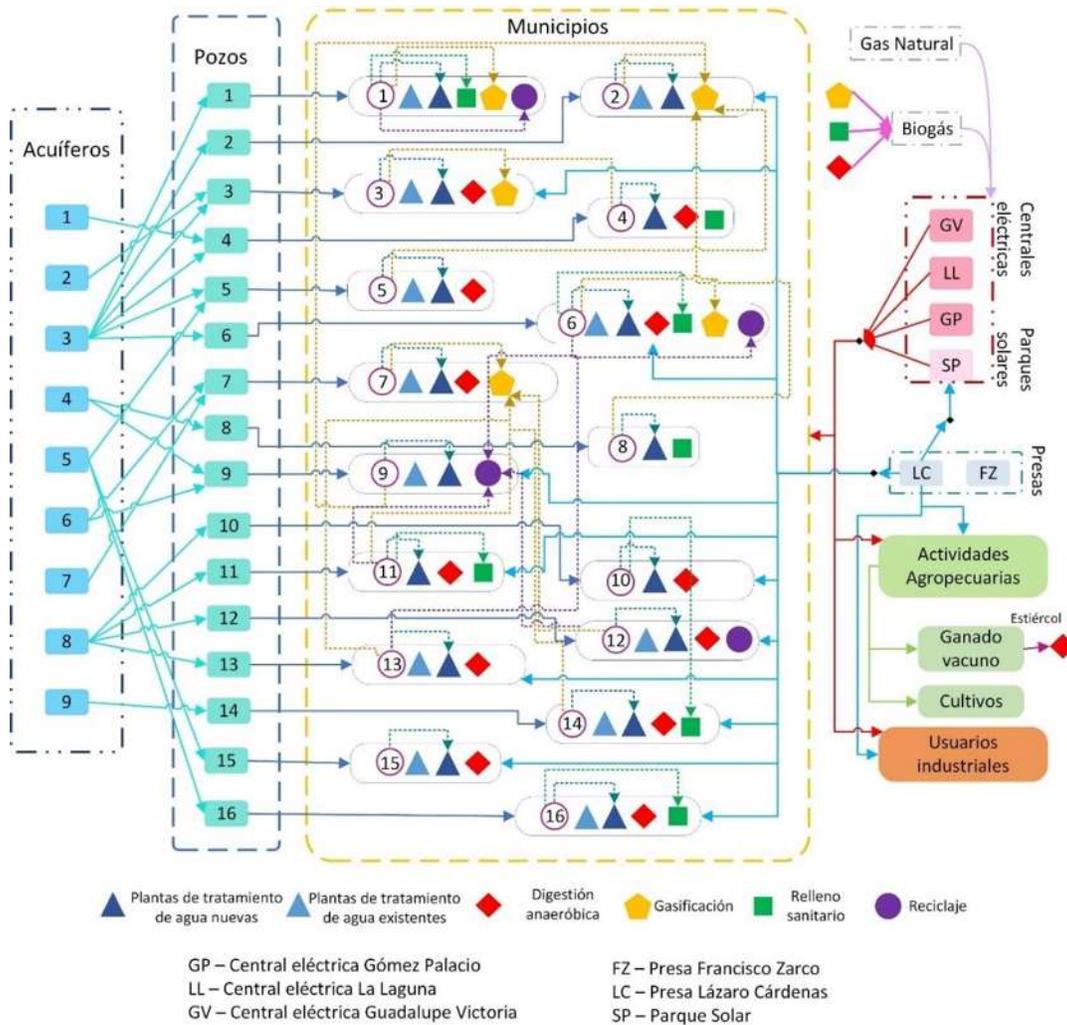


Figura 4. 6. Diagrama de flujo del escenario correspondiente a la minimización de las emisiones.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Enfoque Multistakeholder

Involucrar a los actores o las partes interesadas en la toma de decisiones debe tomarse como un elemento central para la planificación de los sistemas WEF. Las partes interesadas típicas son el gobierno, las agencias reguladoras, los ambientalistas, las organizaciones privadas y la población. Todos ellos tienen diferentes perspectivas, prioridades e intereses que pueden crear conflictos con la ejecución e implementación de cualquier proyecto si no son considerados en el proceso de toma de decisiones. A menudo, los intereses de las partes interesadas se basan en objetivos económicos, ambientales y sociales para lograr el desarrollo sostenible. Por lo tanto, en este trabajo hemos tomado como actores el costo del sistema, la generación de emisiones y el consumo de agua fresca, objetivos que a su vez promueven mejoras sociales en la población.

El método Multistakeholder es una herramienta de toma de decisiones que permite asignar prioridades entre las partes interesadas para generar soluciones que compensen los objetivos involucrados. El problema propuesto consiste en un problema de optimización multiobjetivo, donde los objetivos *AGUA*, *GHGE* y *COSTO* están en conflicto; por lo tanto, priorizar los objetivos puede conducir a crear un conjunto de opciones en las que se involucren las partes interesadas.

Una vez que los objetivos han sido resueltos de manera independiente o realizando la optimización mono-objetivo, es posible identificar el Punto Nadir (NP), que es el punto que representa la peor solución para el sistema pues está construido por todos los límites superiores (*UB*), es decir, el máximo costo ($COSTO^{UB}$), la máxima generación de emisiones ($GHGE^{UB}$) y el máximo consumo de agua ($AGUA^{UB}$). Además, se puede identificar, el Punto Utópico (UP) representado por todos los límites inferiores (*LB*) del sistema, es decir, el mínimo costo ($COSTO^{LB}$), la mínima generación de emisiones ($GHGE^{LB}$) y el mínimo consumo de agua ($AGUA^{LB}$). A pesar de que el UP sería la mejor solución para el sistema, ésta resulta en una solución infactible, es decir no se puede implementar tal solución. Por lo tanto, mediante la minimización de la suma de la normalización de los objetivos costo, emisiones y agua se pueden obtener soluciones donde además se le pueden asignar distintas prioridades a los objetivos (**Ecuación 4.5**).

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

$$SS = \omega^{WATER} \times AGUA^{normalizado} + \omega^{COST} \times COSTO^{normalizado} + \omega^{GHGE} \times GHGE^{normalizado} \quad (4.5)$$

$$GHGE^{normalizado} = \frac{GHGE - GHGE^{LB}}{GHGE^{UB} - GHGE^{LB}} \quad (4.6)$$

$$COSTO^{normalizado} = \frac{COSTO - COSTO^{LB}}{COSTO^{UB} - COSTO^{LB}} \quad (4.7)$$

$$AGUA^{normalizado} = \frac{AGUA - AGUA^{LB}}{AGUA^{UB} - AGUA^{LB}} \quad (4.8)$$

$$0 \leq GHGE^{normalizado} \leq 1 \quad (4.9)$$

$$0 \leq COSTO^{normalizado} \leq 1 \quad (4.10)$$

$$0 \leq AGUA^{normalizado} \leq 1 \quad (4.11)$$

Una forma de evaluar la calidad de las soluciones en los casos generados o que tan cerca se encuentran de sus límites inferiores es mediante la cuantificación del porcentaje de insatisfacción (% Insat.) de los interesados. El porcentaje de insatisfacción para cada uno de los objetivos se calcula por su normalización. Por lo tanto, los resultados de un caso que tiende al 0% significan que el objetivo está cerca de su límite inferior, mientras que un valor que tiende al 100% se refiere a que existe un gran porcentaje de insatisfacción por parte del actor y por lo tanto, el objetivo está cerca de su peor caso.

La **Tabla 4.8** muestra los porcentajes de insatisfacción para cada uno de los objetivos. La solución para el Caso 1 representa la Solución Compromiso (CS), en este caso los pesos asignados son iguales a 1 en cada uno de los objetivos agua, costo y emisiones, es decir no se priorizaron ninguno de los objetivos, esta solución representa la solución más cercana al Punto Utópico (19.69 % de insatisfacción). Como se puede observar, los objetivos a los que se asignó un mayor peso tienen una mayor prioridad en la optimización multiobjetivo, es

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

decir, el modelo determinará el diseño óptimo del sistema dando preferencia a minimizar dicho objetivo para que se acerque a su límite inferior,

Tabla 4. 8 Soluciones generadas usando el método Multistakeholder.

Pesos				Objetivos			Insatisfacción			
COSTO	AGUA	GHGE		COSTO ×10 ⁶ (\$/año)	AGUA (hm ³ /año)	GHGE ×10 ³ (Ton CO ₂ /año)	COSTO	AGUA	GHGE	% Insat.
Punto Utópico				1,324.601	1,450.44	1,297.80	0.00	0.00	0.00	0.00
Punto Nadir				588.55	1,465.29	1,938.28	100.00	100.00	100.00	100.00
1	1.00	1.00	1.00	625.286	1,456.08	1,401.28	4.99	37.93	16.16	19.69
2	1.00	0.00	0.00	624.008	1465.29	1477.31	4.82	99.97	28.03	44.27
3	0.00	1.00	0.00	1,324.601	1,453.63	1,542.95	100.00	21.47	38.28	53.25
4	0.00	0.00	1.00	1,324.601	1,462.47	1,468.48	100.00	80.96	26.65	69.20
5	0.20	0.50	0.30	843.131	1,453.67	1,474.70	34.59	21.74	27.62	27.98
6	0.40	0.20	0.40	616.25	1,456.10	1,443.52	3.76	38.09	22.75	21.53
7	0.10	0.10	0.80	596.798	1455.908	1324.967	1.12	36.79	4.24	14.05
8	0.70	0.30	0.10	631.52	1,456.06	1,516.24	5.84	37.78	34.11	25.91
9	0.30	0.60	0.10	644.099	1,456.06	1,690.54	7.55	37.78	61.32	35.55
10	0.40	0.50	0.10	643.193	1,456.06	1,676.92	7.42	37.78	59.19	34.80
11	0.15	0.8	0.05	848.689	1,453.63	1,449.14	35.34	21.42	23.63	26.80
12	0.05	0.05	0.90	600.419	1,456.42	1,332.86	1.61	40.21	5.47	15.77
13	0.75	0.05	0.25	636.94	1,456.36	1,561.11	6.57	39.85	41.11	29.18
14	0.32	0.45	0.23	633.502	1456.055	1,517.20	6.11	37.78	34.26	26.05
15	0.02	0.75	0.23	851.38	1453.003	1,461.07	35.71	17.23	25.49	26.14
16	0.05	0.12	0.83	598.63	1,456.29	1,313.73	1.37	39.39	2.49	14.42
17	0.47	0.32	0.21	632.823	1,456.06	1,521.40	6.02	37.78	34.91	26.24
18	0.03	0.81	0.16	855.75	1,453.66	1,508.26	36.30	21.63	32.86	30.26
19	0.03	0.16	0.81	855.871	1,454.80	1,418.48	36.32	29.35	18.84	28.17
20	0.63	0.17	0.20	634.739	1,456.06	1,532.57	6.28	37.78	36.66	26.91
21	0.20	0.00	0.80	614.543	1,456.37	1399.091	3.53	39.96	15.82	19.77
22	0.70	0.00	0.30	624.708	1,458.06	1,393.94	4.91	51.31	15.01	23.74
23	0.10	0.90	0.00	863.499	1,453.63	1,671.33	37.35	21.42	58.32	39.03
24	0.14	0.80	0.06	849.578	1,453.63	1,462.51	35.46	21.42	25.72	27.53
25	0.04	0.90	0.06	857.739	1,453.63	1,570.29	36.57	21.44	42.54	33.52

La **Figura 4.8** presenta el frente de pareto para el conjunto de soluciones generadas por el enfoque de múltiples partes interesadas (Multistakeholder). Se incluyen el Punto Utópico y Nadir, así como la solución de los escenarios de optimización mono-objetivo. Como se puede

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

observar, la mayoría de las soluciones se acercan al Punto Utópico, esto indica que para el caso de estudio presentado, en la mayoría de los casos la minimización de los trade-offs se realiza con poca insatisfacción de los actores (costo, emisiones y agua). Por lo tanto, esta metodología permite involucrar con éxito a los actores y brindar diferentes soluciones para los tomadores de decisiones, además brinda la oportunidad de diseñar proyectos sustentables y evitar posibles conflictos futuros si no se considera el interés de uno de los grupos.

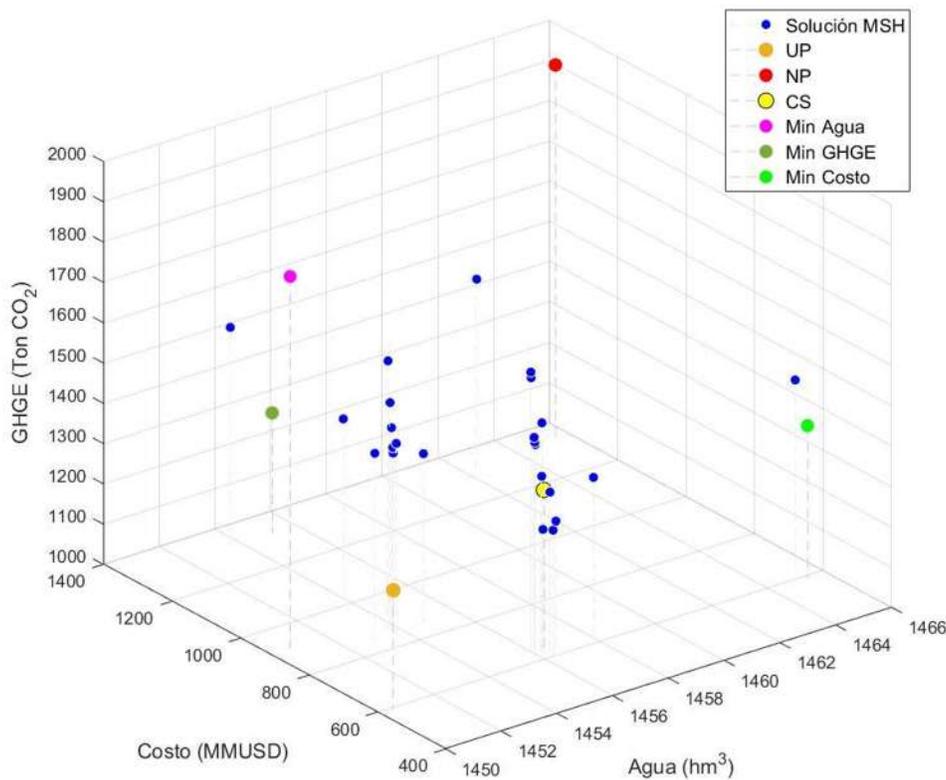


Figura 4. 7 Representación gráfica de las soluciones obtenidas usando el método Multistakeholder.

El modelo matemático propuesto se utilizó para abordar la gestión del nexo WEF a escala regional, y puede aplicarse a escala nacional para abordar la integración de recursos y determinar la selección y ubicación de tecnologías del sistema o como base para la dirección de políticas. Sin embargo, un aspecto importante que debe considerarse es que los modelos de nexo varían según la escala y los objetivos del sistema. Existen interrelaciones complejas

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

entre los sectores del nexo que pueden cambiar a escala espacial, temporal y organizacional (Chang et al., 2020). Por lo tanto, estudiar un sistema a escala nacional implica una mayor diversidad de ecosistemas, donde también pueden existir diferentes condiciones sociales y políticas asociadas al uso de los recursos disponibles. Además, existen regiones dentro del país que están muy desconectadas del resto, ya que no se practica el intercambio de recursos. Por lo tanto, un modelo a escala nacional es un sistema más complejo ya que requiere datos específicos de cada uno de los diferentes ecosistemas dentro del país, como el rendimiento de los cultivos, los requisitos de agua para riego, la radiación solar, la velocidad del viento y las extracciones de agua. En consecuencia, escalar el modelo aumentará significativamente su tamaño. Además, la disponibilidad de datos es esencial para abordar el nexo WEF. Comúnmente, los datos están disponibles en informes gubernamentales. Sin embargo, la mayoría de las veces no existen estándares de reporte consistentes, ya que son publicados por diferentes organismos locales o nacionales y esto puede generar incertidumbre en la evaluación del nexo (Zhang et al., 2018). Por lo tanto, la aplicabilidad del modelo debe seleccionarse considerando la escala, los objetivos de la investigación y la disponibilidad de datos.

Implicaciones para la teoría y la práctica

En este trabajo se presenta un modelo de optimización para llevar a cabo una mejor gestión de los recursos y una producción más limpia. En las últimas décadas, las preocupaciones ambientales han promovido el uso de sistemas de generación distribuida con energías renovables, tecnologías WtE y fuentes de agua no convencionales para reducir el consumo insostenible de recursos. Por lo tanto, en este trabajo se unen varias opciones para diseñar un esquema WEF bajo diferentes objetivos económicos y ambientales. Los hallazgos muestran que diseñar un sistema WEF que cumpla con los objetivos económicos conduce a un mayor uso de agua dulce, ya que no se realizan inversiones en plantas de tratamiento de aguas residuales para la reutilización del agua. De lo contrario, la atención a los objetivos ambientales conduce a esquemas más costosos y ambientalmente sostenibles. Los resultados muestran que entre las tecnologías WtE para la gestión de MSW, los vertederos son la tecnología más cara y la tecnología con mayor generación de GHGE.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

Seleccionar un diseño de nexo WEF que optimice un solo objetivo conduce a sistemas insostenibles, por lo tanto, lidiar con los impactos en sectores que no se consideraron podría ser más desafiante y costoso de solucionar. Considerando esto, una de las principales implicaciones de este estudio es que proporciona una metodología para la toma de decisiones que involucra a múltiples partes interesadas con diferentes objetivos. A través de la metodología multistakeholder se asignan diferentes prioridades o criterios a los actores, y una vez obtenidos los resultados es posible identificar los efectos y el diseño de los criterios utilizados para la solución. Esta podría ser una forma efectiva de evitar conflictos entre las organizaciones y la comunidad relacionados con el sistema WEF y promover la sostenibilidad y eficiencia del proceso.

4.4 Conclusiones

El concepto nexo WEF se ha convertido en una herramienta urgente hacia el desarrollo sostenible. El estudio del nexo a nivel regional es una forma eficiente de identificar vulnerabilidades en los sectores, promover la producción más limpia y disminuir el impacto ambiental. En este trabajo se ha presentado un modelo de optimización multiobjetivo para la gestión del nexo WEF que involucra a múltiples actores que tienen objetivos en común (costo, consumo de agua y minimización de emisiones). Como caso de estudio, se seleccionó la Región Lagunera en México para implementar el enfoque propuesto debido a la inseguridad energética, económica y alimentaria. Los resultados obtenidos en los esquemas de optimización mono-objetivo muestran que el escenario *Min Agua* presenta un incremento en la generación de emisiones de 49% en comparación con el escenario *Min GHGE*, y su costo es alrededor de dos veces mayor que el escenario *Min Costo*, esto está asociado principalmente a los vertederos seleccionados en municipios, que son la tecnología WtE más cara. Además, los resultados muestran que la reutilización del agua es una alternativa de suministro de agua que reduce el consumo de agua fresca. La reutilización y el reciclaje de los recursos son fundamentales para el desarrollo sostenible, la economía circular y la resiliencia.

Además, se presentó un enfoque de optimización multistakeholder para la planificación sostenible del nexo WEF y para apoyar la toma de decisiones, que además indica el nivel de insatisfacción de cada uno de los actores involucrados. Los resultados muestran que la Solución de Compromiso, en la que no se prioriza a las partes interesadas, es la solución más

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES PARTES INTERESADAS

cercana al punto utópico que representa el 19.69 % de la insatisfacción promedio. Cabe señalar que cuanto mayor sea la prioridad asignada a una de las metas de los actores, más se acercará el objetivo al punto utópico. Este enfoque es una herramienta eficaz para unir los intereses de los actores involucrados y no existe limitación en cuanto al número de participantes que se pueden considerar.

Capítulo 5. Un marco de nexo agua-energía-alimentos basado en la asignación óptima de recursos

5.1 Introducción

La seguridad hídrica-energética-alimentaria se refiere al acceso a agua, energía y alimentos, los cuales se han visto amenazados por la rápida urbanización, el aumento de la demanda y el cambio climático. Se ha destacado que un factor impulsor para lograr la sostenibilidad a largo plazo es la seguridad del nexo WEF, y su mejora implica políticas óptimas de planificación y gestión de recursos, así como una adecuada asignación o distribución de recursos. El nexo WEF requiere incorporar herramientas para orientar la asignación de recursos y la toma de decisiones de planificadores sociales y gobiernos para lograr la seguridad de los recursos y promover la sustentabilidad. La asignación de recursos es una de las principales preocupaciones en la planificación social. El concepto del esquema de asignación se desarrolló originalmente a través de una perspectiva social para medir el bienestar de la sociedad. Sin embargo, hasta la fecha se han reportado diferentes esquemas de asignación o distribución y se han asociado a medidas de *justicia*, para evitar las desigualdades entre objetivos o metas de interés. Normalmente, cuando se resuelven los modelos de optimización, la asignación de recursos esta guiada por la maximización de la suma de las utilidades de los stakeholders o de los objetivos de interés, esto se conoce como enfoque utilitario o *bienestar social*. Sin embargo, de acuerdo con sus propiedades axiomáticas, la resolución de problemas basada en este enfoque puede conducir a soluciones que no son únicas ya que diferentes asignaciones de recursos pueden dar la misma utilidad total del sistema. Además, bajo la función de bienestar social puede que no se capturen adecuadamente las escalas o tamaños de los objetivos/índices de interés debido a su naturaleza afín. Por lo tanto, puede favorecer grandes objetivos y dar lugar a desigualdades entre ellos. La propiedad de invariancia afín indica que una asignación bajo escalamiento de los objetivos de interés es igual a la transformación afín de la asignación obtenida bajo el sistema original. Esto asegura que la asignación sea invariable en la escala. Sin embargo, algunos esquemas presentan una invariancia afín débil y no hay garantía de que la asignación para el sistema transformado sea la misma que en el sistema original (Sampat y Zavala, 2019). Como alternativa a este enfoque, se han reportado diferentes esquemas de asignación

o distribución y se han asociado a medidas de justicia para evitar las desigualdades entre objetivos. Por ejemplo, el esquema Rawlsian propuesto por Rawls (Rawls, 1971). En este enfoque, se maximiza la asignación del objetivo menos aventajado a evaluar. Sin embargo, este enfoque también puede conducir a soluciones que no son únicas. Además, no captura las escalas correctamente y es posible que se ignoren los objetivos de gran escala. Por otro lado, Nash (Nash, 1950) propuso un esquema de asignación que maximiza el producto de las asignaciones, lo que equivale a maximizar la suma de los logaritmos de las asignaciones. Esta formulación captura las escalas del sistema de forma natural y brinda soluciones únicas. El uso de estos esquemas de distribución permite resolver el problema desde diferentes perspectivas y encontrar soluciones que capturen las escalas de los objetivos de interés. Los esquemas de distribución de recursos han sido estudiados en distintos ámbitos para guiar la toma de decisiones proponiendo soluciones más justas. Sin embargo, no se han abordado medidas de justicia de este tipo relacionadas con los esquemas de asignación en los sistemas WEF. Por lo tanto, este trabajo presenta una formulación matemática para el diseño y manejo óptimo de los recursos para mejorar la seguridad del nexo energía-agua-alimentos, donde se evalúa la distribución óptima de los recursos a través de diferentes esquemas de asignación. En este trabajo, la seguridad de los recursos se mide a través de indicadores relacionados con la disponibilidad, el acceso y la sustentabilidad de agua, energía y alimentos, el problema se analizó bajo diferentes esquemas de asignación (bienestar social, Rawlsian, Nash y Rawlsian-Nash) para maximizar el beneficio global en cuanto a la seguridad de los recursos (incluyendo agua, energía y alimentos) para de esa manera obtener el diseño óptimo del sistema.

5.2 Metodología

5.2.1 Planteamiento del Problema

La integración macroscópica del nexo energía-agua-alimentos para un conjunto de regiones se aborda de la siguiente manera:

- Se consideran las demandas de agua, energía (electricidad) y alimentos para las actividades domésticas, industriales, agrícolas y ganaderas.
- Las demandas están determinadas por la población que tiene acceso a agua, electricidad y alimentos.

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

- La demanda de agua puede ser satisfecha por agua subterránea o superficial a través de pozos, represas, agua tratada para su reusó y agua tratada en plantas desalinizadoras.
- La demanda de electricidad puede ser satisfecha por las centrales eléctricas existentes, los parques solares y eólicos y la energía de biomasa.
- Los requisitos energéticos de las centrales eléctricas pueden satisfacerse utilizando combustibles fósiles o biocombustibles.
- La demanda de alimentos se cubre con la producción agropecuaria.
- La producción de alimentos está determinada por los macronutrientes mínimos requeridos por la población.
- Los residuos sólidos urbanos son tratados en tecnologías de conversión de residuos o energía (WtE) (es decir, digestión anaeróbica, incineración, pirólisis y gasificación) para la conversión de biomasa en biocombustibles con el fin de cubrir los requerimientos de electricidad en la región. La cantidad de residuos sólidos municipales per cápita por año se multiplicó por el número de habitantes de cada región para calcular la cantidad de residuos sólidos municipales generados por año.

El problema consiste en determinar la distribución óptima de agua, energía y alimentos en la región teniendo en cuenta los objetivos económicos, ambientales y sociales. El modelo busca optimizar la seguridad del nexo WEF mediante la evaluación de la disponibilidad, accesibilidad y sustentabilidad de agua, electricidad y alimentos. El modelo se formula en base a la superestructura general presentada en la **Figura 5.1** que indica todas las alternativas posibles para resolver el problema. Además, se propone evaluar diferentes esquemas de asignación para atender la distribución de recursos.

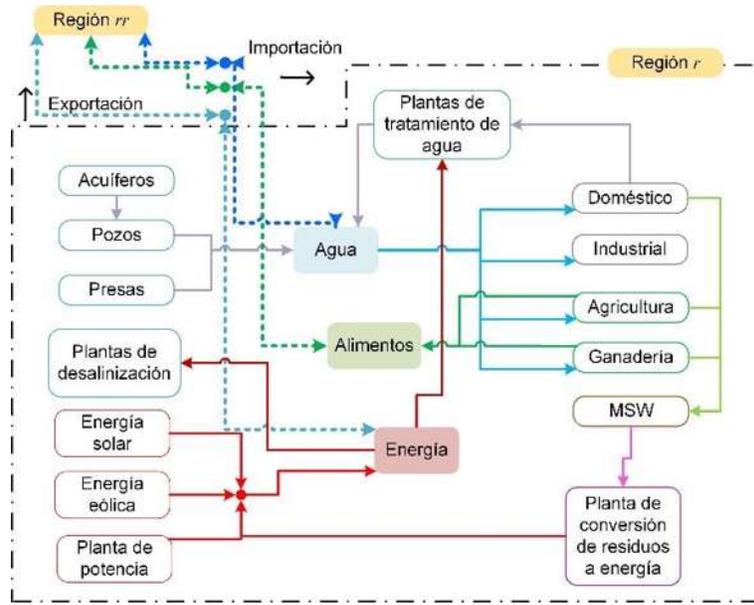


Figura 5. 1 Superestructura general.

5.2.2 Modelo de optimización

Como se mencionó anteriormente, se desarrolló el modelo matemático basado en la superestructura presentada en la **Figura 5.1**. Es importante mencionar que modelar todas las interacciones WEF conduce a un problema complejo de optimización matemática. Sin embargo, este estudio se centra en la distribución de recursos para maximizar la seguridad del nexo WEF en un sistema macroscópico a través de diferentes esquemas de asignación. El modelo matemático consiste en balances de masa de agua, electricidad y diferentes tipos de alimentos, restricciones operativas para determinar la existencia de nuevas tecnologías para su implementación, costo de capital anualizado y costo operativo de las tecnologías, y emisiones asociadas a la operación de WtE, plantas de tratamiento de agua, combustibles y producción de alimentos. El modelo matemático está formulado para explorar la seguridad de los recursos en diferentes regiones, y considera la importación/exportación de agua, energía y alimentos entre las regiones abordadas que se denominan importación/exportación

interna, y también se pueden dar recursos de importación/exportación de otras regiones. regiones del resto del mundo denominadas importación/exportación externa.

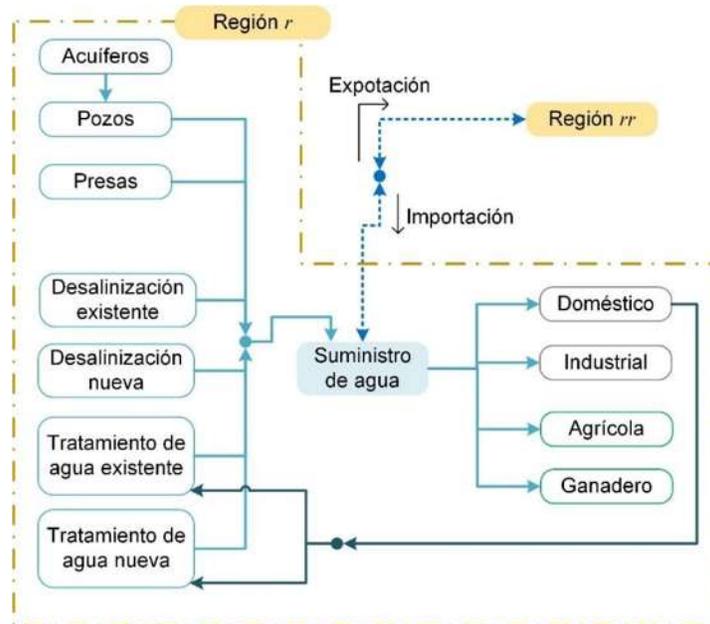


Figura 5. 2 Superestructura del sector agua.

El sector del agua considera la producción de agua de fuentes subterráneas y superficiales, agua de los sistemas de desalinización y agua doméstica tratada para reusó. En este caso, se consideran plantas desalinizadoras y plantas de tratamiento de agua existentes y nuevas para satisfacer la demanda de agua (**Figura 5.2**). Como se puede observar, el modelo matemático se formula considerando diferentes alternativas para la integración de recursos; sin embargo, algunas alternativas pueden ser eliminadas de acuerdo con el caso de estudio evaluado. Por ejemplo, si una región no tiene un territorio conectado a un océano, la planta desalinizadora no se considera en el modelo. Para el sector energético, la electricidad fue el principal tipo de energía involucrado en el modelo y fue el único tipo de energía para cuantificar la seguridad del sector. Una limitación importante del modelo es que la demanda de energía de transporte hacia la distribución de alimentos no se incluyó en el modelo. La **Figura 5.3** muestra las tecnologías consideradas para el modelo de formulación; la energía se puede producir a partir de procesos de energía convencionales y renovables. Por otro lado, WtE

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

para el tratamiento de MSW se involucran para producir biocombustibles que pueden ayudar a satisfacer los requerimientos energéticos en las centrales eléctricas. Finalmente, el sector alimentario se formuló considerando la producción de alimentos a partir de la agricultura y la ganadería para satisfacer la demanda alimentaria de la población (**Figura 5.4**). En muchos países, los patrones de consumo de alimentos distan mucho de los hábitos alimentarios saludables. Sin embargo, si el objetivo de un país es mejorar la seguridad alimentaria de la población, debe asegurar la disponibilidad de diferentes tipos de alimentos. Según la OMS (WHO, 2021), una dieta saludable es fundamental para una buena nutrición y salud, y comprende una combinación de diferentes alimentos como cereales, legumbres, frutas, verduras y alimentos de origen animal. Por tanto, considerando el concepto de seguridad alimentaria, se modela la producción de alimentos en base a la ración diaria de los diferentes grupos de alimentos (cereales, legumbres, frutas, verduras y alimentos de origen animal) que debe tener una persona. Las porciones máximas y mínimas por día dan cuenta de los macronutrientes que una persona necesita ingerir para una buena nutrición (**Tabla 5.1**).

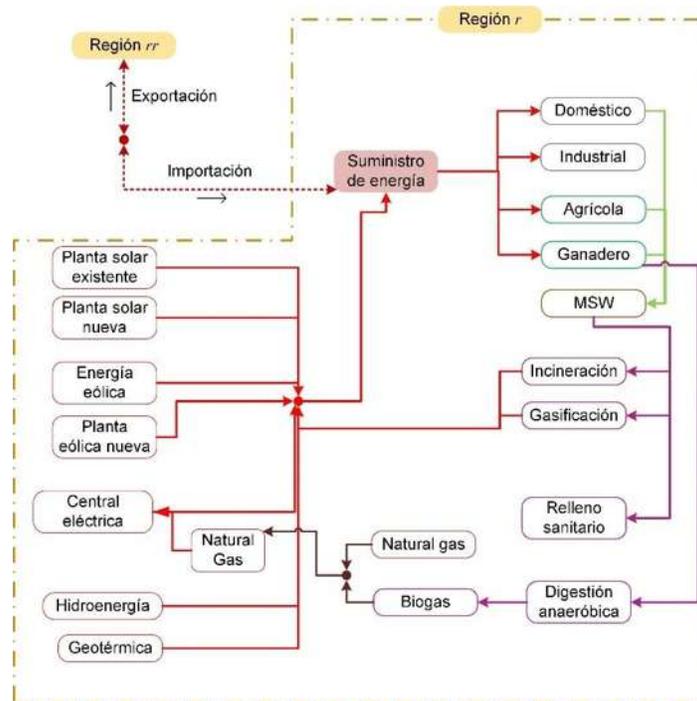


Figura 5. 3 Superestructura del sector energético.

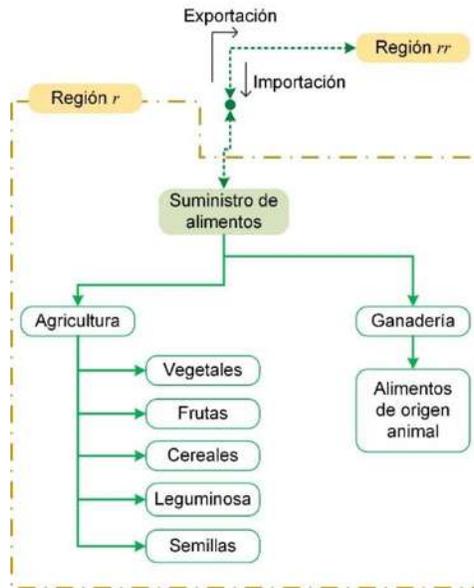


Figura 5. 4 Superestructura del sector alimentario.

Tabla 5. 1 Información nutricional de diferentes tipos de alimentos (Health Secretary, 2010).

	Calorías (kcal)	Proteína (g)	Carbohidratos (g)	Grasas (g)	Porciones por día	
					Min	Max
Vegetales	25	2	4	0	3	5
Frutas	60	0	15	0	2	4
Granos	70	2	15	0	6	11
Lácteos	95	9	12	2	1	2
Carne	40	7	0	1	2	3
Leguminosas	120	8	20	1	2	3
Semillas	70	3	3	5	0	2

De esta forma, se puede cuantificar cuánto alimento se produce para cubrir el acceso a las personas asumiendo que las porciones diarias de los diferentes grupos de alimentos se basan en una dieta saludable. La producción de alimentos de los diferentes tipos puede ser menor o mayor a la requerida para una dieta saludable, sin embargo, el modelo busca determinar la producción óptima de alimentos para atender los requerimientos nutricionales. El comportamiento humano es muy complejo y no se puede obligar a las personas a seguir una dieta saludable, pero al menos tiene que haber suficientes alimentos para proporcionar una

dieta equilibrada. Por otro lado, en este trabajo se asumió que la población sigue una dieta omnívora porque la mayoría de la población sigue este patrón de consumo, sin embargo, se pueden agregar restricciones al modelo para evaluar el impacto de tener una dieta vegana o vegetariana. Sin embargo, los estudios sobre el consumo de agua en dietas omnívoras, vegetarianas y veganas han demostrado un importante ahorro de agua en dietas vegetarianas y veganas (Zucchinelli et al., 2021). Por ejemplo, una dieta de supervivencia requeriría 1 m^3 de agua por día per cápita, mientras que una dieta elaborada principalmente con productos animales necesita unos 10 m^3 por día per cápita.

A continuación, se presenta el modelo matemático del nexo agua-energía-alimentos (WEF). Primero, se presenta la descripción matemática del sector del agua la cual está representada en la **Figura 5.2**, seguida por el sector de la energía (**Figura 5.3**), y finalmente, el sector alimentario. Además, los indicadores de seguridad del nexo WEF están representados en las ecuaciones (5.154) - (5.166). El modelo matemático se formula considerando diferentes alternativas para la integración de recursos; sin embargo, algunas alternativas pueden ser eliminadas de acuerdo al caso de estudio evaluado.

Sector hídrico

El agua producida en una región (W_r^{prod}) es igual al agua extraída de pozos (W_r^{well}) y presas (W_r^{dam}) y el agua generada en las plantas desalinizadoras (W_r^{des}) así como el agua reusada ($W_r^{reclaimed}$):

$$W_r^{prod} = W_r^{well} + W_r^{dam} + W_r^{des} + W_r^{reclaimed}, \quad \forall r \quad (5.1)$$

La demanda de agua (W_r^{dem}) se satisface con el agua producida en la región más el agua importada a otras regiones ($W_r^{imp-exp}$). Aquí, $W_r^{imp-exp}$ es una variable que representa la importación/exportación de agua; si el agua producida en la región excede la demanda, entonces el agua puede exportarse a otras regiones. Por otro lado, si el agua producida no es suficiente para cubrir la demanda de agua, entonces se necesita importar agua de otras regiones.

$$W_r^{prod} + W_r^{imp-exp} = W_r^{dem}, \quad \forall r \quad (5.2)$$

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

$$W_r^{imp-exp} = W_r^{imp} - W_r^{exp}, \quad \forall r \quad (5.3)$$

La importación de agua puede provenir de otras de las regiones que podemos denominar regiones internas ($W_r^{imp-int}$) o se puede importar de regiones externas ($W_r^{imp-ext}$):

$$W_r^{imp} = W_r^{imp-int} + W_r^{imp-ext}, \quad \forall r \quad (5.4)$$

En la misma base, el agua exportada es igual al agua exportada a otras de las regiones en estudio ($W_r^{exp-int}$) más agua exportada a regiones externas ($W_r^{exp-ext}$):

$$W_r^{exp} = W_r^{exp-int} + W_r^{exp-ext}, \quad \forall r \quad (5.5)$$

La importación total de agua de las regiones internas es igual a la suma de las importaciones de agua de las regiones internas rr consideradas:

$$W_r^{imp} = \sum_{rr} W_{rr,r}^{imp-int-r}, \quad \forall r \quad (5.6)$$

La exportación total de agua es igual a la suma del agua exportada a otras regiones internas:

$$W_r^{exp} = \sum_{rr} W_{r,rr}^{exp-int-r}, \quad \forall r \quad (5.7)$$

Por lo tanto, la importación de agua de la región r es igual al agua exportada de la región rr . Por ejemplo, en dos regiones A y B, si se importa agua de la región B a la región A, entonces el agua importada a la región A es igual al agua exportada de la región B.

$$W_{rr,r}^{imp-int-r} = W_{r,rr}^{exp-int-r}, \quad \forall r, \forall rr \quad (5.8)$$

La demanda de agua debe cubrir la demanda de agua en el sector doméstico. (W_r^{dom}), agrícola (W_r^{agr}), ganadero (W_r^{lives}) y sector industrial (W_r^{ind}):

$$W_r^{dem} = W_r^{dom} + W_r^{agr} + W_r^{lives} + W_r^{ind}, \quad \forall r \quad (5.9)$$

Acuíferos

La disponibilidad de agua en acuíferos ($w_{r,a}^A$) es igual a la recarga de agua ($w_{r,a}^{recharge}$) en cada acuífero menos el agua extraída de los pozos ($w_{a,w,r}^{a-w}$):

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

$$W_{r,a}^A = W_{r,a}^{\text{recharge}} - \sum_w W_{r,a,w}^{a-w}, \quad \forall a, \forall r \quad (5.10)$$

El agua en los acuíferos debe ser mayor que un nivel mínimo de agua en cada acuífero ($W_{r,a}^{\min}$):

$$W_{r,a}^A \geq W_{r,a}^{\min} \quad \forall a, \forall r \quad (5.11)$$

El agua extraída de pozos ($W_{w,r}^{\text{well}}$) es igual al agua extraída de los acuíferos ($W_{a,w,r}^{a-w}$):

$$\sum_a W_{r,a,w}^{a-w} = W_{r,w}^{\text{well}} \quad \forall w, \forall r \quad (5.12)$$

Pozos

Agua total extraída en pozos (W_r^{well}) es igual a la extracción de agua en cada pozo ($W_{w,r}^{\text{well}}$):

$$W_r^{\text{well}} = \sum_w W_{r,w}^{\text{well}}, \quad \forall r \quad (5.13)$$

Presas

Captación total de agua en presas (W_r^{dams}) es igual a la captación de agua en cada una de las presas:

$$W_r^{\text{dam}} = \sum_d W_{r,d}^{\text{dam-ext}}, \quad \forall r \quad (5.14)$$

El agua en las presas es igual a la recarga de agua ($W_{d,r}^{\text{dam-nr}}$) menos el agua extraída ($W_{r,d}^{\text{dam-ext}}$):

$$W_{r,d}^{\text{dam}} = W_{r,d}^{\text{dam-nr}} - W_{r,d}^{\text{dam-ext}}, \quad \forall d, \forall r \quad (5.15)$$

El agua en las presas debe ser inferior a la capacidad máxima de la presa ($\text{Cap}_d^{\text{dam-max}}$):

$$W_{r,d}^{\text{dam}} \leq \text{Cap}_d^{\text{dam-max}}, \quad \forall d, \forall r \quad (5.16)$$

Además, el agua disponible en las presas debe ser mayor que su capacidad de nivel mínimo ($Cap_d^{dam-min}$):

$$w_{r,d}^{dam} \geq Cap_d^{dam-min}, \quad \forall d, \forall r \quad (5.17)$$

Planta desalinizadora

El agua desalinizada (W_r^{des}) es igual al agua de mar tratada en las plantas desaladoras existentes ($w_{r,z}^{des-ext}$) y nuevas ($w_{r,zn}^{des-new}$):

$$W_r^{des} = \sum_z w_{r,z}^{des-ext} + \sum_{zn} w_{r,zn}^{des-new}, \quad \forall r \quad (5.18)$$

Plantas desalinizadoras existentes

El agua tratada en las plantas desalinizadoras se calcula como el agua desalada extraída del mar ($w_{r,z}^{sea-ext}$) multiplicado por un factor que representa la eficiencia de la planta desalinizadora ($\alpha^{des-ext}$):

$$w_{r,z}^{des-ext} = w_{r,z}^{sea-ext} \cdot \alpha^{des-ext}, \quad \forall r, \forall z \quad (5.19)$$

El agua desalada ($w_{r,z}^{sea-ext}$) es igual al agua de mar de entrada ($w_{r,z}^{sea-ext}$) multiplicado por un factor que representa el agua desalada por unidad de agua de mar (β^{des}):

$$w_{r,z}^{sea-ext} = w_{r,z}^{sea-ext} \cdot \beta^{des}, \quad \forall r, \forall z \quad (5.20)$$

La capacidad de la planta desalinizadora ($Cap_{r,z}^{des-ext}$) debe ser mayor que el agua de mar de entrada, e inferior a la capacidad máxima de la planta ($Cap_{r,z}^{des-ext-max}$):

$$Cap_{r,z}^{des-ext} \geq w_{r,z}^{sea-ext}, \quad \forall r, \forall z \quad (5.21)$$

$$Cap_{r,z}^{des-ext} \leq Cap_{r,z}^{des-ext-max}, \quad \forall r, \forall z \quad (5.22)$$

Plantas desalinizadoras nuevas

Se propone la instalación de nuevas plantas desalinizadoras para satisfacer la demanda de agua. La capacidad de las nuevas plantas desalinizadoras ($Cap_{r,zn}^{des-new}$) debe ser mayor que el

agua de mar que se puede tratar ($w_{r,zn}^{sea-new}$), y debe ser inferior a la capacidad máxima que se puede instalar ($Cap_{r,zn}^{des-new-max}$) multiplicado por la variable binaria que determina la existencia de la planta ($y_{r,zn}^{des-new}$):

$$w_{r,zn}^{des-new} = w_{r,zn}^{sea-new} \cdot \alpha^{des-new}, \quad \forall r, \forall zn \quad (5.23)$$

$$w_{r,zn}^{sea-new} = w_{r,zn}^{sea} \cdot \beta^{des}, \quad \forall r, \forall zn \quad (5.24)$$

$$Cap_{r,zn}^{des-new} \geq w_{r,zn}^{sea-new}, \quad \forall r, \forall zn \quad (5.25)$$

$$Cap_{r,zn}^{des-new} \geq Cap_{r,zn}^{des-new-max} \cdot y_{r,zn}^{des-new}, \quad \forall r, \forall zn \quad (5.26)$$

El costo de capital de la planta desalinizadora (CC_r^{des}) se calcula como el costo fijo de la planta desalinizadora (FC_{zn}^{des}) multiplicado por su variable binaria, más el costo variable (VC_{zn}^{des}) multiplicado por la capacidad de la planta:

$$CC_r^{des} = \sum_{zn} FC_{zn}^{des} \cdot y_{r,zn}^{des-new} + VC_{zn}^{des} \cdot Cap_{r,zn}^{des-new}, \quad \forall r \quad (5.27)$$

El costo de operación de la planta (OC_r^{des}) es igual al costo unitario de operación (ζ^{des-}) multiplicado por el flujo de agua desalada:

$$OC_r^{des} = \sum_{zn} w_{r,zn}^{des-new} \cdot \zeta_{zn}^{des-new} + \sum_z w_{r,z}^{des-ext} \cdot \zeta_z^{des-ext}, \quad \forall r \quad (5.28)$$

Agua Reusada

El agua reusada es igual al agua tratada saliente de las plantas de tratamiento de agua existentes ($w_r^{reclaimed-ext}$) y el agua recuperada de las plantas de tratamiento de agua nuevas ($w_r^{reclaimed-new}$):

$$W_r^{reclaimed} = w_r^{reclaimed-ext} + w_r^{reclaimed-new}, \quad \forall r \quad (5.29)$$

Las aguas residuales generadas en la región (w_r^{waste}) se calculan como en base al volumen de agua doméstica utilizada multiplicada por un factor que representa la porción de agua que se puede tratar ($\chi^{waste-dom}$):

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

$$w_r^{waste} = W_r^{dom} \cdot \chi^{waste-dom}, \quad \forall r \quad (5.30)$$

Las aguas residuales podrían enviarse a las plantas de tratamiento existentes ($w_{r,i}^{gwext}$) y nuevas ($w_{r,j}^{gwnew}$) o pueden no ser tratadas:

$$w_r^{waste} = w_r^{sewage} + \sum_i w_{r,i}^{gwext} + \sum_j w_{r,j}^{gwnew}, \quad \forall r \quad (5.31)$$

El agua tratada es igual al volumen de agua residual que entra a la planta de tratamiento multiplicado por la eficiencia de la planta ($\chi_{r,i}^{gw-ext}$):

$$w_r^{reclaimed-ext} = \sum_i w_{r,i}^{gwext} \cdot \chi_{r,i}^{gw-ext}, \quad \forall r \quad (5.32)$$

El volumen de agua que entra a la planta de tratamiento de agua debe ser inferior a la capacidad de la planta ($Cap_{r,i}^{wastew-ext}$):

$$w_{r,i}^{gwext} \leq Cap_{r,i}^{wastew-ext}, \quad \forall r, \forall i \quad (5.33)$$

La capacidad de la planta debe ser inferior a su capacidad máxima instalada ($Cap_{r,i}^{wastewext-Max}$):

$$Cap_{r,i}^{wastew-ext} \leq Cap_{r,i}^{wastewext-Max}, \quad \forall r, \forall i \quad (5.34)$$

El agua tratada en las nuevas plantas es igual al volumen de agua que entra a la planta de tratamiento de agua multiplicado por la eficiencia de la planta ($\chi_{r,j}^{gw-new}$):

$$w_r^{reclaimed-new} = \sum_j w_{r,j}^{gwnew} \cdot \chi_{r,j}^{gw-new}, \quad \forall r \quad (5.35)$$

Además, el volumen de agua que se tratará en la planta de tratamiento de agua debe ser inferior a la capacidad de la planta de tratamiento de aguas residuales:

$$w_{r,j}^{gwnew} \leq Cap_{r,j}^{wastew-new}, \quad \forall r, \forall j \quad (5.36)$$

La capacidad de la planta debe ser menor que su capacidad máxima multiplicada por su variable binaria ($y_{r,j}^{wastew}$):

$$Cap_{r,j}^{wastew-new} \leq Cap_j^{wastewnew-Max} \cdot y_{r,j}^{wastew}, \quad \forall r, \forall j \quad (5.37)$$

El costo de capital de las plantas de tratamiento de aguas residuales nuevas (CC_r^{wastew}) es igual al costo fijo de la planta por su variable binaria, más el costo variable multiplicado por la capacidad de la planta:

$$CC_r^{wastew} = \sum_j FC_j^{wastew} \cdot y_{r,j}^{wastew} + VC_j^{wastew} \cdot Cap_{r,j}^{wastew-new}, \quad \forall r \quad (5.38)$$

El costo de operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales. (OC_r^{wastew}) es igual al costo unitario de operación por el caudal de agua tratada:

$$OC_r^{wastew} = \sum_i W_{r,i}^{gwext} \cdot \zeta_i^{gwext} + \sum_j W_{r,j}^{gwnew} \cdot \zeta_j^{gwnew}, \quad \forall r \quad (5.39)$$

Sector Doméstico

La demanda de agua en el sector doméstico es igual a la población que tiene acceso al agua ($Pop_r^{AccessW}$) multiplicado por un factor que representa el consumo de agua per cápita (ρ^{water}):

$$W_r^{dom} = Pop_r^{AccessW} \cdot \rho^{water}, \quad \forall r \quad (5.40)$$

La población de la región ($Population_r$) es igual a la población con y sin acceso al agua ($Pop_r^{NAccessW}$):

$$Population_r = Pop_r^{AccessW} + Pop_r^{NAccessW}, \quad \forall r \quad (5.41)$$

La población sin acceso al agua debe ser inferior a la población mínima con acceso al agua (θ_r^{w-min}):

$$Pop_r^{NAccessW} \leq \theta_r^{w-min}, \quad \forall r \quad (5.42)$$

La población mínima sin acceso al agua es un objetivo fijado por el tomador de decisiones. En este trabajo se pretende que el agua disponible sea suficiente para dar acceso a la mayor parte posible de la población.

Agricultura

La demanda de agua en el sector agrícola (W_r^{agr}) es igual a la producción de alimentos ($F_{f,r}^{agr}$) multiplicado por un factor que representa el consumo de agua por unidad de alimento producido ($\alpha_f^{water-agr}$):

$$W_r^{agr} = \sum_f F_{r,f}^{agr} \cdot \alpha_f^{water-agr}, \quad \forall r \quad (5.43)$$

Ganadería

La demanda de agua en el sector ganadero (W_r^{lives}) es igual a la producción de alimentos ($F_{f,r}^{lives}$) multiplicado por un factor que representa el consumo de agua por unidad de alimento ($\alpha_f^{water-lives}$):

$$W_r^{lives} = \sum_f F_{r,f}^{lives} \cdot \alpha_f^{water-lives}, \quad \forall r \quad (5.44)$$

Costo de importación de agua

El costo de la importación de agua ($OC_r^{water-imp}$) es igual al volumen de agua importada multiplicado por los costos unitarios:

$$OC_r^{water-imp} = W_r^{imp} \cdot \zeta^{ouc-impwater}, \quad \forall r \quad (5.45)$$

Costo de exportación de agua

Las ventas asociadas a la exportación de agua ($OS_r^{water-exp}$) son iguales al volumen de agua exportada a las regiones multiplicado por el costo unitario de venta:

$$OS_r^{water-exp} = W_r^{exp} \cdot \zeta^{ouc-expwater}, \quad \forall r \quad (5.46)$$

Venta de agua

Las ventas asociadas al agua (OS_r^{water}) se pueden calcular multiplicando el costo unitario de venta del agua (ζ) por la demanda de agua:

$$OS_r^{water} = W_r^{dem} \cdot \zeta^{ouc-water}, \quad \forall r \quad (5.47)$$

Emisiones

Las emisiones del sector hídrico están asociadas al volumen de agua residual y al funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua residual. Por tanto, para cuantificar las emisiones de CO₂ se utiliza un factor de emisión que se multiplica por el flujo de agua:

$$O_r^{sewage} = W_r^{sewage} \cdot \varphi^{sewage}, \quad \forall r \quad (5.48)$$

$$O_r^{wwtp} = W_r^{reclaimed} \cdot \varphi^{wwtp}, \quad \forall r \quad (5.49)$$

Sector energético

Para el sector energético, la electricidad fue el principal tipo de energía involucrada en el modelo y fue el único tipo de energía utilizado para cuantificar la seguridad del sector.

La producción de electricidad en una región (E_r^{prod}) es igual a la electricidad producida a partir de combustibles fósiles (E_r^{fossil}) o energías renovables como la eólica (E_r^{eolic}), solar fotovoltaica (E_r^{pv}), hidroenergía (E_r^{hydro}), y biomasa ($E_r^{biomass}$):

$$E_r^{prod} = E_r^{fossil} + E_r^{pv} + E_r^{biomass} + E_r^{eolic} + E_r^{hydro}, \quad \forall r \quad (5.50)$$

La demanda de electricidad (E_r^{dem}) está cubierta por la electricidad producida en la región más la electricidad importada de otras regiones ($E_r^{imp-exp}$). Así como en el sector hídrico, $E_r^{imp-exp}$ es una variable que representa la importación/exportación de electricidad, si la electricidad producida en la región excede la demanda, entonces la electricidad puede exportarse a otras regiones. Por otro lado, si la electricidad producida no es suficiente para cubrir la demanda de electricidad, entonces se debe importar electricidad de otras regiones.

$$E_r^{prod} + E_r^{imp-exp} = E_r^{dem}, \quad \forall r \quad (5.51)$$

$$E_r^{imp-exp} = E_r^{imp} - E_r^{exp}, \quad \forall r \quad (5.52)$$

La importación de electricidad puede provenir de regiones internas ($E_r^{imp-int}$) o puede ser importado desde regiones externas ($E_r^{imp-ext}$):

$$E_r^{imp} = E_r^{imp-int} + E_r^{imp-ext}, \quad \forall r \quad (5.53)$$

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

La electricidad exportada es igual a la electricidad exportada a otras regiones internas ($E_r^{exp-int}$) más la electricidad exportada a regiones externas:

$$E_r^{exp} = E_r^{exp-int} + E_r^{exp-ext}, \quad \forall r \quad (5.54)$$

La importación de electricidad es igual a la suma de la importación de electricidad de las regiones internas:

$$E_r^{imp} = \sum_{rr} E_{rr,r}^{imp-int-r}, \quad \forall r \quad (5.55)$$

La exportación de electricidad es igual a la suma de la electricidad exportada a las regiones internas:

$$E_r^{exp} = \sum_{rr} E_{r,rr}^{exp-int-r}, \quad \forall r \quad (5.56)$$

La importación de electricidad de la región r desde la región rr es igual a la electricidad exportada en la región rr hacia la región r .

$$E_{rr,r}^{imp-int-r} = E_{r,rr}^{exp-int-r}, \quad \forall r, \forall rr \quad (5.57)$$

La demanda de electricidad es igual a la demanda de electricidad en sector doméstico (E_r^{dom}), agricultura (E_r^{agr}), ganadería (E_r^{lives}) y el sector industrial (E_r^{ind}):

$$E_r^{dem} = E_r^{dom} + E_r^{agr} + E_r^{lives} + E_r^{ind}, \quad \forall r \quad (5.58)$$

La importación de electricidad es igual a la importación de energía de otras regiones:

$$E_r^{imp} = \sum_{rr} E_{rr,r}^{imp-r}, \quad \forall r \quad (5.59)$$

La exportación de electricidad es igual a la energía exportada a otras regiones:

$$E_r^{exp} = \sum_{rr} E_{r,rr}^{exp-r}, \quad \forall r \quad (5.60)$$

$$E_{rr,r}^{imp-r} = E_{r,rr}^{exp-r}, \quad \forall r, \forall rr \quad (5.61)$$

Centrales eléctricas

El total de electricidad producida a partir de combustibles fósiles es igual a la sumatoria de la electricidad generada en todas las centrales eléctricas ($E_{r,cy}^{cyc\text{om}}$).

$$E_r^{fossil} = \sum_{cy} E_{r,cy}^{cyc\text{om}}, \quad \forall r \quad (5.62)$$

La electricidad generada en las plantas de potencia convencionales ($E_{r,cy}^{cyc\text{om}}$) que utilizan gas natural como combustible es igual a la cantidad de gas natural consumido ($fuel_{r,cy}^{cyc\text{om}}$) multiplicado por un factor que representa la eficiencia de la planta ($\chi^{cyc\text{om}}$):

$$E_{r,cy}^{cyc\text{om}} = fuel_{r,cy}^{cyc\text{om}} \cdot \chi^{cyc\text{om}}, \quad \forall r, \forall cy \quad (5.63)$$

La capacidad de la planta de energía debe ser mayor que la electricidad que se podría generar:

$$E_{r,cy}^{cyc\text{om}} \leq Cap_{r,cy}^{cyc\text{om}}, \quad \forall r, \forall cy \quad (5.64)$$

La capacidad de la central eléctrica debe ser inferior a su capacidad máxima:

$$Cap_{r,cy}^{cyc\text{om}} \leq Cap_{r,cy}^{cyc\text{om-max}}, \quad \forall r, \forall cy \quad (5.65)$$

El costo de operación de las centrales eléctricas (OC_r^{ng}) es igual a la electricidad generada por el costo unitario de operación:

$$OC_r^{ng} = \sum_{cy} E_{r,cy}^{cyc\text{om}} \cdot \zeta^{cyc\text{om}}, \quad \forall r \quad (5.66)$$

Energía solar fotovoltaica

La energía solar es igual a la electricidad generada en las plantas solares existentes ($e_{r,pve}^{pv-ex}$) y las plantas nuevas ($e_{r,pvn}^{pv-new}$):

$$E_r^{solar} = \sum_{pve} e_{r,pve}^{pv-ex} + \sum_{pvn} e_{r,pvn}^{pv-new}, \quad \forall r \quad (5.67)$$

Plantas solares existentes

La capacidad de las plantas solares existentes ($Cap_{r,pve}^{pv-ex}$) debe ser mayor que la energía producida:

$$Cap_{r,pve}^{pv-ex} \geq e_{r,pve}^{pv-ex}, \quad \forall r, \forall pve \quad (5.68)$$

Plantas solares nuevas

La electricidad generada en las plantas solares nuevas es igual al producto de la radiación solar (α^{pv}), el área del panel solar ($A_{pvn,r}^{pv-ex}$), la relación de rendimiento (PR) y la eficiencia (η^{pv}) del panel solar:

$$e_{r,pvn}^{pv-new} = A_{pvn,r}^{pv-ex} \cdot \eta^{pv} \cdot \alpha^{pv} \cdot PR, \quad \forall r, \forall pvn \quad (5.69)$$

La superficie del parque solar debe ser inferior a la superficie máxima de instalación:

$$A_{r,pvn}^{pv-max} \geq A_{r,pvn}^{pv-new}, \quad \forall r, \forall pvn \quad (5.70)$$

Además, la capacidad del parque solar debe ser superior a la energía generada:

$$e_{r,pvn}^{pv-new} \leq Cap_{r,pvn}^{pv-new}, \quad \forall r, \forall pvn \quad (5.71)$$

La capacidad del parque solar debe ser inferior a la capacidad solar máxima multiplicada por su variable binaria correspondiente ($y_{r,pvn}^{solar}$):

$$Cap_{r,pvn}^{pv-new-max} \cdot y_{r,pvn}^{solar} \geq Cap_{r,pvn}^{pv-new}, \quad \forall r, \forall pvn \quad (5.72)$$

El costo capital de la planta solar (CC_r^{solar}) es igual al costo fijo por la variable binaria, más el costo variable por la capacidad de la planta solar:

$$CC_r^{solar} = \sum_{pvn} FC_{pvn}^{pv-new} \cdot y_{r,pvn}^{solar} + VC_{pvn}^{pv-new} \cdot Cap_{r,pvn}^{pv-new}, \quad \forall r \quad (5.73)$$

El costo de operación de la planta solar (OC_r^{solar}) es igual a la electricidad generada por el costo unitario de operación:

$$OC_r^{solar} = \sum_{pve} e_{r,pve}^{pv-ex} \cdot \zeta_{pve}^{pv-ex} + \sum_{pvn} e_{r,pvn}^{pv-new} \cdot \zeta_{pvn}^{pv-new}, \quad \forall r \quad (5.74)$$

Biomasa

La energía de la biomasa es igual a la energía generada en las plantas de incineración ($e_{r,comb}^{comb}$) y la planta de gasificación ($e_{r,gasif}^{gasif}$):

$$E_r^{biomass} = \sum_{comb} e_{r,comb}^{comb} + \sum_{gasi} e_{r,gasi}^{gasif}, \quad \forall r \quad (5.75)$$

Los residuos sólidos municipales se calcularon en función de la población de la región. La cantidad de residuos sólidos municipales per cápita por año se multiplicó por el número de habitantes de la región para calcular la cantidad de residuos sólidos municipales generados por año. Los residuos sólidos urbanos pueden enviarse a las plantas de incineración (G_r^{comb}), gasificación (G_r^{gasif}) y digestión anaeróbica (G_r^{adw}) para su tratamiento o a los rellenos sanitarios (G_r^{rs}):

$$G_r^{msw} = \text{Population}_r \cdot \varphi_r^{msw}, \quad \forall r \quad (5.76)$$

$$G_r^{msw} = G_r^{comb} + G_r^{gasif} + G_r^{adw} + G_r^{rs}, \quad \forall r \quad (5.77)$$

Incineración

Los residuos sólidos urbanos podrían ser enviados a diferentes plantas incineradoras ($g_{r,comb}^{comb}$):

$$G_r^{comb} = \sum_{comb} g_{r,comb}^{comb}, \quad \forall r \quad (5.78)$$

La electricidad generada en las plantas de incineración ($e_{r,comb}^{comb}$) es igual a los residuos sólidos urbanos tratados por la eficiencia de la planta (η^{comb}):

$$e_{r,comb}^{comb} = g_{r,comb}^{comb} \cdot \eta^{comb}, \quad \forall r, \forall comb \quad (5.79)$$

Los residuos sólidos urbanos enviados a la planta de incineración deben ser inferiores a la capacidad de las plantas:

$$g_{r,comb}^{comb} \leq \text{Cap}_{r,comb}^{comb}, \quad \forall r, \forall comb \quad (5.80)$$

La capacidad de la planta de incineración debe ser inferior a la capacidad máxima multiplicada por su variable binaria ($y_{r,comb}^{comb}$):

$$\text{Cap}_{r,comb}^{comb} \leq \text{Cap}_{r,comb}^{comb-max} \cdot y_{r,comb}^{comb}, \quad \forall r, \forall comb \quad (5.81)$$

Los costos de capital de la planta de incineración (CC_r^{comb}) se calculan multiplicando el costo fijo por la variable binaria, más el costo variable por la capacidad de la planta solar:

$$CC_r^{comb} = \sum_{comb} FC_{comb}^{comb} \cdot y_{r,comb}^{comb} + VC_{comb}^{comb} \cdot Cap_{r,comb}^{comb}, \quad \forall r \quad (5.82)$$

Los costos de operación de la planta (OC_r^{comb}) son iguales al 4% (ζ^{comb}) del costo de capital de la planta:

$$OC_r^{comb} = CC_r^{comb} \cdot \zeta^{comb}, \quad \forall r \quad (5.83)$$

Gasificación

Los residuos sólidos urbanos podrían ser enviados a diferentes plantas de gasificación ($g_{r,gasi}^{gasif}$):

$$G_r^{gasif} = \sum_{gasif} g_{r,gasi}^{gasif}, \quad \forall r \quad (5.84)$$

La electricidad generada en las plantas de gasificación ($e_{r,gasi}^{gasif}$) es igual a los residuos sólidos urbanos tratados en la planta multiplicados por la eficiencia de la planta (η^{gasif}):

$$e_{r,gasi}^{gasif} = g_{r,gasi}^{gasif} \cdot \eta^{gasif}, \quad \forall r \quad (5.85)$$

La cantidad de residuos sólidos urbanos enviados a la planta de gasificación deben ser inferior a la capacidad de las plantas de gasificación:

$$e_{r,gasi}^{gasif} \leq Cap_{r,gasi}^{gasif}, \quad \forall r, \forall gasi \quad (5.86)$$

Además, la capacidad de la planta de gasificación debe ser inferior a la capacidad máxima multiplicada por su variable binaria ($y_{r,gasi}^{gasif}$):

$$Cap_{r,gasi}^{gasif} \leq Cap_{r,gasi}^{gasif-max} \cdot y_{r,gasi}^{gasif}, \quad \forall r, \forall gasi \quad (5.87)$$

Los costos de capital de la planta de gasificación (CC_r^{gasif}) se calculan multiplicando el costo fijo de la planta por su variable binaria, más el costo variable por la capacidad de la planta:

$$CC_r^{gasif} = \sum_{gasi} FC_{gasi}^{gasif} \cdot y_{r,gasi}^{gasif} + VC_{gasi}^{gasif} \cdot Cap_{r,gasi}^{gasif}, \quad \forall r \quad (5.88)$$

Los costos de operación de la planta (OC_r^{gasif}) son iguales al 4% (ζ^{gasif}) del costo de capital de la planta de gasificación:

$$OC_r^{gasif} = CC_r^{gasif} \cdot \zeta^{gasif}, \quad \forall r \quad (5.89)$$

Digestión anaeróbica

Los residuos sólidos urbanos podrían ser enviados a diferentes plantas de digestión anaeróbica ($g_{r,adw}^{adw}$):

$$G_r^{adw} = \sum_{adw} g_{r,adw}^{adw}, \quad \forall r \quad (5.90)$$

El biogás generado en las plantas de digestión anaeróbica ($fuel_{r,adw}^{biogas}$) es igual a los residuos sólidos urbanos tratados por la eficiencia de la planta (η^{gasif}):

$$fuel_{r,adw}^{biogas} = g_{r,adw}^{adw} \cdot \eta^{adw}, \quad \forall r \quad (5.91)$$

La cantidad de residuos sólidos urbanos enviados a la planta de digestión anaeróbica debe ser inferior a la capacidad de las plantas:

$$g_{r,adw}^{adw} \leq Cap_{r,adw}^{adw}, \quad \forall r, \forall adw \quad (5.92)$$

La capacidad de la planta debe ser inferior a la capacidad máxima multiplicada por su variable binaria ($y_{r,adw}^{adw}$):

$$Cap_{r,adw}^{adw} \leq Cap_{r,adw}^{adw-max} \cdot y_{r,adw}^{adw}, \quad \forall r, \forall adw \quad (5.93)$$

El costo de capital de la planta de digestión anaeróbica (CC_r^{adw}) es igual al costo fijo de la planta por su variable binaria, más el costo variable por la capacidad de la planta:

$$CC_r^{adw} = \sum_{adw} FC_{adw}^{adw} \cdot y_{r,adw}^{adw} + VC_{adw}^{adw} \cdot Cap_{r,adw}^{adw}, \quad \forall r \quad (5.94)$$

El costo de operación de la planta (OC_r^{adw}) el igual al 4% (ζ^{adw}) del costo de capital de la planta de digestión anaeróbica:

$$OC_r^{adw} = CC_r^{adw} \cdot \zeta^{adw}, \quad \forall r \quad (5.95)$$

Relleno sanitario

Los residuos sólidos urbanos pueden ser enviados a los rellenos sanitarios, por lo tanto, la cantidad de residuos enviados al relleno sanitario debe ser inferior a su capacidad máxima:

$$G_r^{rs} = \sum_{rs} g_{r,rs}^{rs}, \quad \forall r \quad (5.96)$$

$$g_{r,la}^{rs} \leq Cap_{r,la}^{rs}, \quad \forall r, \forall la \quad (5.97)$$

Fuel

El gas natural requerido ($fuel_r^{cyc\text{com}-req}$) puede cubrirse por la compra de gas natural ($fuel_r^{ng-e}$) más el biogás generado en las plantas de digestión anaeróbica ($fuel_{r,adw}^{biogas}$):

$$fuel_r^{cyc\text{com}-req} = fuel_r^{ng-e} + \sum_{ad} fuel_{r,adw}^{biogas}, \quad \forall r \quad (5.98)$$

El gas natural es distribuido a las distintas centrales eléctricas:

$$fuel_r^{cyc\text{com}-req} = \sum_{cy} fuel_{r,cy}^{cyc\text{com}}, \quad \forall r \quad (5.99)$$

Sector doméstico

La demanda de electricidad del sector doméstico (E_r^{dom}) está en función de la población que tiene acceso a la electricidad (Pop_r^{AccE}) multiplicado por la electricidad consumida per cápita (ρ^{energy}):

$$E_r^{dom} = Pop_r^{AccE} \cdot \rho^{energy}, \quad \forall r \quad (5.100)$$

La población total es igual a la suma de la población que tiene acceso a la electricidad (Pop_r^{AccE}) y la población sin acceso a la electricidad (Pop_r^{NAccE}):

$$Population_r = Pop_r^{AccE} + Pop_r^{NAccE}, \quad \forall r \quad (5.101)$$

La población sin acceso a la electricidad debe ser inferior a un mínimo que se fija por el tomador de decisiones ($\theta_r^{e-\min}$):

$$Pop_r^{NAccessE} \leq \theta_r^{e-\min}, \quad \forall r \quad (5.102)$$

Agricultura y ganadería

La energía requerida en los sectores agrícola y el ganadero es igual a la producción de alimentos multiplicada por un factor que indica la energía necesaria para producir una unidad de alimento ($\alpha_f^{energy-}$):

$$E_r^{agr} = \sum_f F_{r,f}^{agr} \cdot \alpha_f^{energy-agr}, \quad \forall r \quad (5.103)$$

$$E_r^{lives} = \sum_f F_{r,f}^{lives} \cdot \alpha_f^{energy-lives}, \quad \forall r \quad (5.104)$$

Vínculo energía - agua

La energía consumida en el sector hídrico comprende la energía necesaria para la extracción de aguas subterráneas y superficiales, la energía necesaria para el funcionamiento de plantas desalinizadoras, plantas de tratamiento de agua y la energía necesaria para la distribución de agua:

$$E_r^{wfe} = E_r^{wgr} + E_r^{wsr} + E_r^{wdes} + E_r^{wwwtp} + E_r^{wdistr}, \quad \forall r \quad (5.105)$$

El factor (α) indica la energía consumida en los diferentes procesos asociados al manejo de agua:

$$E_r^{wgr} = W_r^{well} \cdot \alpha_r^{well}, \quad \forall r \quad (5.106)$$

$$E_r^{wsr} = W_r^{dam} \cdot \alpha_r^{dam}, \quad \forall r \quad (5.107)$$

$$E_r^{wdes} = W_r^{des} \cdot \alpha_r^{des}, \quad \forall r \quad (5.108)$$

$$E_r^{wwwtp} = W_r^{reclaimed} \cdot \alpha_r^{wwwtp}, \quad \forall r \quad (5.109)$$

$$E_r^{wdistr} = W_r^{wdem} \cdot \alpha_r^{wdistr}, \quad \forall r \quad (5.110)$$

Emisiones

Las emisiones de los combustibles fósiles son iguales a la cantidad de combustible fósil utilizado multiplicada por su factor de emisión (φ):

$$O_r^{ng} = E_r^{fossil} \cdot \varphi^{ng-o}, \quad \forall r \quad (5.111)$$

$$O_r^{rs} = G_r^{rs} \cdot \varphi^{rs-o}, \quad \forall r \quad (5.112)$$

$$O_r^{comb} = G_r^{comb} \cdot \varphi^{comb-o}, \quad \forall r \quad (5.113)$$

$$O_r^{gasif} = G_r^{gasif} \cdot \varphi^{gasif-o}, \quad \forall r \quad (5.114)$$

$$O_r^{adw} = G_r^{adw} \cdot \varphi^{adw-o}, \quad \forall r \quad (5.115)$$

Costos de operación

El costo de operación de los combustibles es igual a la cantidad de combustible fósil requerido por su costo unitario (ζ).

$$OC_r^{ng} = fuel_r^{ng-e} \cdot \zeta^{ng-o}, \quad \forall r \quad (5.116)$$

Costos de importación de energía

Los costos de importación de energía ($OC_r^{energy-imp}$) se calculan multiplicando la electricidad importada por el costo unitario de la electricidad:

$$OC_r^{energy-imp} = E_r^{imp} \cdot \zeta^{ouc-impenergy}, \quad \forall r \quad (5.117)$$

Costo de venta de electricidad

El costo de venta de electricidad ($OS_r^{energy-exp}$) es igual a la electricidad exportada de otras regiones multiplicada por los costos unitarios de venta:

$$OS_r^{energy-exp} = E_r^{exp} \cdot \zeta^{ouc-expenergy}, \quad \forall r \quad (5.118)$$

Venta de energía

La venta de energía (OS_r^{energy}) se puede calcular multiplicando el costo unitario de venta de electricidad (ζ) multiplicado por la demanda de electricidad:

$$OS_r^{energy} = E_r^{dem} \cdot \zeta^{ouc-energy}, \quad \forall r \quad (5.119)$$

Sector alimentario

La producción de alimentos ($F_{f,r}^{prod}$) es igual a los alimentos producidos en el sector agrícola ($F_{f,r}^{agr}$) y el sector ganadero ($F_{f,r}^{lives}$):

$$F_{f,r}^{prod} = F_{f,r}^{agr} + F_{f,r}^{lives}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.120)$$

La producción de alimentos más los alimentos importados/exportados a otras regiones ($F_{r,f}^{imp-exp}$) deben ser igual a la demanda de alimentos ($F_{f,r}^{dem}$):

$$F_{f,r}^{prod} + F_{r,f}^{imp-exp} = F_{f,r}^{dem}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.121)$$

$$F_{r,f}^{imp-exp} = F_{r,f}^{imp} - F_{r,f}^{exp}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.122)$$

Los alimentos importados son iguales a los alimentos importados de las regiones internas ($F_{r,f}^{imp-int}$) más los alimentos importados de regiones externas ($F_{r,f}^{imp-ext}$):

$$F_{r,f}^{imp} = F_{r,f}^{imp-int} + F_{r,f}^{imp-ext}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.123)$$

Los alimentos exportados equivalen a los alimentos exportados a otras regiones del estado ($F_{r,f}^{exp-int}$) más los alimentos exportados a regiones externas ($F_{r,f}^{exp-ext}$):

$$F_{r,f}^{exp} = F_{r,f}^{exp-int} + F_{r,f}^{exp-ext}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.124)$$

La importación de alimentos es igual a la suma de las importaciones de alimentos de las regiones internas:

$$F_{r,f}^{imp} = \sum_{rr} F_{rr,r,f}^{imp-int-r}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.125)$$

La exportación de alimentos es igual a la suma de los alimentos exportados a las regiones internas:

$$F_{r,f}^{\text{exp}} = \sum_{rr} F_{r,rr,f}^{\text{exp-int-r}}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.126)$$

La importación de alimentos de la región rr a la región r es igual a los alimentos exportados en la región rr a la región r .

$$F_{rr,r,f}^{\text{imp-int-r}} = F_{r,rr,f}^{\text{exp-int-r}}, \quad \forall r, \forall rr, \forall f \quad (5.127)$$

La producción de alimentos debe ser inferior a la producción mínima de alimentos de la región y superior a la producción máxima de alimentos:

$$F_{f,r}^{\text{prod-min}} \leq F_{f,r}^{\text{prod}} \leq F_{f,r}^{\text{prod-max}}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.128)$$

La población total es igual a la suma de la población con acceso a alimentos (Pop_r^{AccessF}) más la población sin acceso a alimentos (Pop_r^{NAccessF}):

$$\text{Population}_r = Pop_r^{\text{AccessF}} + Pop_r^{\text{NAccessF}}, \quad \forall r \quad (5.129)$$

La población sin acceso a alimentos debe ser inferior a una población mínima que si fija el tomador de decisiones ($\theta_r^{\text{f-min}}$):

$$Pop_r^{\text{NAccessF}} \leq \theta_r^{\text{f-min}}, \quad \forall r \quad (5.130)$$

Los nutrientes requeridos por la población ($N_{r,n}^{\text{pop-total}}$) son iguales a la población que tiene acceso a los alimentos (Pop_r^{Acc}) multiplicado por los nutrientes mínimos que una persona debe consumir para una dieta equilibrada (μ_n^{min}):

$$N_{r,n}^{\text{pop-total}} = Pop_r^{\text{AccessF}} \cdot \mu_n^{\text{min}}, \quad \forall r, \forall n \quad (5.131)$$

Los nutrientes a los que la población tiene acceso ($N_{r,n}^{\text{pop-acc}}$) se calculan multiplicando la demanda de alimentos por su contenido de nutrientes:

$$N_{r,n}^{\text{pop-acc}} = \sum_f F_{r,f}^{\text{dem}} \cdot \mu_{f,n}^{\text{content}}, \quad \forall r, \forall n \quad (5.132)$$

Para calcular los nutrientes requeridos por la población se clasificaron los alimentos en grupos (fg) como verduras, frutas, cereales, alimentos de origen animal, legumbres, semillas y lácteos. Luego, se fijaron las porciones mínimas y máximas de cada grupo de alimentos por persona para determinar la demanda óptima de alimentos que aporte los nutrientes requeridos a la población.

$$P_{r,fg}^{dem-min} = Pop_r^{AccessF} \cdot \mu_{fg}^{portionmin}, \quad \forall r, \forall fg \quad (5.133)$$

$$F_{r,f}^{portiondem} = F_{r,f}^{dem} \cdot \mu_f^{portion}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.134)$$

$$P_{r,fg}^{dem-max} = Pop_r^{AccessF} \cdot \mu_{fg}^{portionmax}, \quad \forall r, \forall fg \quad (5.135)$$

$$P_{r,fg}^{dem-min} \leq P_{r,fg}^{dem}, \quad \forall r, \forall fg \quad (5.136)$$

$$P_{r,fg}^{dem-max} \geq P_{r,fg}^{dem}, \quad \forall r, \forall fg \quad (5.137)$$

$$P_{r,fg}^{dem} = \sum_f F_{r,f}^{portiondem} \cdot \nu_{fg}^{fg}, \quad \forall r, \forall fg \quad (5.138)$$

Sobre la misma base, las porciones de alimentos asociadas a la producción e importación de alimentos se calculan de la siguiente manera:

$$F_{r,f}^{portionprod} = F_{r,f}^{prod} \cdot \mu_f^{portion}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.139)$$

$$P_{r,fg}^{dem} = \sum_f F_{r,f}^{portiondem} \cdot \nu_{fg}^{fg}, \quad \forall r, \forall fg \quad (5.140)$$

$$F_{r,f}^{portionimp} = F_{r,f}^{imp} \cdot \mu_f^{portion}, \quad \forall r, \forall f \quad (5.141)$$

$$P_{r,fg}^{imp} = \sum_f F_{r,f}^{portionimp} \cdot \nu_{fg}^{fg}, \quad \forall r, \forall fg \quad (5.142)$$

Emisiones

Las emisiones generadas (O^{agr}) en los sectores agropecuario son iguales a la producción de alimentos multiplicada por su factor de emisión (φ_f^{-o}):

$$O_r^{agr} = \sum_f F_f^{agr} \cdot \varphi_f^{agr-o}, \quad \forall r \quad (5.143)$$

$$O^{lives} = \sum_f F_f^{lives} \cdot \phi_f^{agr-o}, \quad \forall r \quad (5.144)$$

Costos de importación de alimentos

El costo de importación de los alimentos ($OC_r^{food-imp}$) es igual a los alimentos importados de otras regiones multiplicado por los costos unitarios:

$$OC_r^{food-imp} = F_r^{imp} \cdot \zeta^{ouc-impfood}, \quad \forall r \quad (5.145)$$

Costos de venta de alimentos

El costo de venta de alimentos ($OS_r^{food-exp}$) es igual a los alimentos exportados de otras regiones multiplicado por los costos unitarios de venta:

$$OS_r^{food-exp} = F_r^{exp} \cdot \zeta^{ouc-exp food}, \quad \forall r \quad (5.146)$$

Venta de alimentos

La venta de alimentos (OS_r^{food}) se calcula multiplicando el precio de venta de los alimentos (ζ) por la demanda de energía:

$$OS_r^{food} = F_r^{dem} \cdot \zeta^{ouc-food}, \quad \forall r \quad (5.147)$$

Costo total de operación

El costo total de operación (TOC) es igual al costo de operación de los recursos importados, combustibles fósiles y costo de operación de las plantas seleccionadas:

$$TOC_r = \left[\begin{array}{l} OC_r^{des} + OC_r^{wastew} + OC_r^{solar} + OC_r^{comb} + \\ OC_r^{gasif} + OC_r^{adw} + OC_r^{ng-e} + \\ OC_r^{water-imp} + OC_r^{energy-imp} + OC_r^{food-imp} + OC_r^{ng} \end{array} \right], \quad \forall r \quad (5.148)$$

Costo total de capital

El costo de capital total (TCC) es igual a la suma de los costos de capital de las plantas nuevas:

$$TCC_r = k_f \cdot \begin{bmatrix} CC_r^{wastew} + CC_r^{des} + CC_r^{adw} \\ CC_r^{solar} + CC_r^{comb} + CC_r^{gasif} \end{bmatrix}, \quad \forall r \quad (5.149)$$

El costo de capital es anualizado, para lo cual se ha incluido un factor de anualización. El costo de capital de las tecnologías está compuesto por el costo fijo y el costo variable. El costo de capital se multiplica por el factor de anualización (k_f) para anualizar el costo de inversión de las tecnologías a través de la siguiente ecuación:

$$k_f = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.150)$$

Donde i es la tasa de interés (10%) y n corresponde al período de vida del proyecto (supuesto de 30 años). De esta manera, se pueden sumar el costo total de capital y los costos totales de operación.

Ventas

Las ventas ($Sales$) son iguales a las ventas de agua, energía y alimentos:

$$Sales_r = OS_r^{water-exp} + OS_r^{water} + OS_r^{energy-exp} + OS_r^{energy} + OS_r^{food-exp} + OS_r^{food}, \quad \forall r \quad (5.151)$$

Costos

El costo total (C^{cost}) es igual al costo de capital total más el costo de operación total:

$$C_r^{cost} = TCC_r + TOC_r, \quad \forall r \quad (5.152)$$

Emisiones

Las emisiones de gases de efecto invernadero ($O^{emissions}$) son iguales a las emisiones generadas en la producción de energía y alimentos:

$$O_r^{emissions} = O_r^{sewage} + O_r^{wwtp} + O_r^{ng} + O_r^{agr} + O_r^{lives} + O_r^{comb} + O_r^{gasif} + O_r^{adw} + O_r^{rs}, \quad \forall r \quad (5.153)$$

Índice de seguridad del nexo energía-agua-alimentos

El indicador de seguridad del nexo WEF es una métrica para evaluar el progreso en agua, energía y seguridad alimentaria de una región. El índice de seguridad del nexo WEF se compone de nueve parámetros, que son indicadores de agua, energía y seguridad alimentaria en una región. La seguridad hídrica se evalúa a través de tres parámetros: disponibilidad de agua ($I_{Availability}^W$), accesibilidad al agua ($I_{Accessibility}^W$), y la sustentabilidad del sector hídrico ($I_{Sustainability}^W$). En el caso de la energía, la seguridad es evaluada a través del indicador de disponibilidad de electricidad ($I_{Availability}^E$), accesibilidad de electricidad ($I_{Accessibility}^E$), y sustentabilidad del sector energético ($I_{Sustainability}^E$). Por último, la disponibilidad de alimentos ($I_{Availability}^F$), accesibilidad de alimentos ($I_{Accessibility}^F$), y sustentabilidad del sector alimentario ($I_{Sustainability}^F$) son los parámetros utilizados para evaluar la seguridad alimentaria. Todos los indicadores son evaluados por las siguientes relaciones. Cuanto mayor es el índice, se logra el mejor rendimiento.

Seguridad hídrica

La seguridad hídrica es igual al promedio de los índices de disponibilidad, accesibilidad y sustentabilidad:

$$I^{water} = \sum_r (I_{Availability}^W)_r + \sum_r (I_{Accessibility}^W)_r + \sum_r (I_{Sustainability}^W)_r \quad (5.154)$$

La disponibilidad de agua se mide como la relación entre el agua producida en la región que involucra la disponibilidad de agua y el agua producida a partir de procesos no convencionales, y la demanda de agua:

$$(I_{Availability}^W)_r = \frac{W_r^{prod}}{W_r^{dem}} \quad (5.155)$$

La accesibilidad al agua es igual a la población total menos la población sin acceso a los servicios de agua ($Pop_m^{NAccessW}$) dividido por la población total:

$$(I_{Accessibility}^W)_r = \frac{Population_r - Pop_r^{NAccessW}}{Population_r} \quad (5.156)$$

La sustentabilidad del agua se mide como la relación entre el agua importada y la demanda de agua.

$$(I_{Sustainability}^W)_r = \frac{W_r^{dem} - W_r^{imp}}{W_r^{dem}} \quad (5.157)$$

Existen diferentes métricas para representar la sustentabilidad, sin embargo, cuantificamos la sostenibilidad en base a la relación entre la importación de recursos y la demanda de recursos porque una región con mucha importación de recursos no es sostenible ya que depende de recursos de fuentes externas.

Seguridad energética

La seguridad energética es igual al promedio de los índices de disponibilidad, accesibilidad y sustentabilidad considerando la electricidad como único tipo de energía involucrada en el modelo:

$$I^{energy} = \sum_r (I_{Availability}^E)_r + \sum_r (I_{Accessibility}^E)_r + \sum_r (I_{Sustainability}^E)_r \quad (5.158)$$

La disponibilidad de energía es igual a la relación entre la electricidad generada y la demanda de electricidad (E^{demand}):

$$(I_{Availability}^E)_r = \frac{E_r^{prod}}{E_r^{dem}} \quad (5.159)$$

La accesibilidad energética es igual a la población total menos la población sin acceso a la electricidad ($Pop_m^{NAccessE}$) dividida por la población total:

$$(I_{Accessibility}^E)_r = \frac{Population_r - Pop_r^{NAccessE}}{Population_r} \quad (5.160)$$

La sustentabilidad energética se mide como el cociente entre la electricidad generada por energías renovables y la demanda total de electricidad:

$$(I_{Sustainability}^E)_r = \frac{E_r^{solar} + E_r^{eolic} + E_r^{biomass}}{E_r^{dem}} \quad (5.161)$$

Seguridad alimentaria

La seguridad alimentaria es igual al promedio de los índices de disponibilidad, accesibilidad y sustentabilidad de alimentos:

$$I^{food} = \sum_r (I_{Availability}^F)_r + \sum_r (I_{Accessibility}^F)_r + \sum_r (I_{Sustainability}^F)_r \quad (5.162)$$

La disponibilidad de alimentos es igual a la relación entre las porciones de alimentos que consume la población con acceso ($N_n^{pop-req}$) y las porciones totales que se deben consumir para el total de la población ($N_n^{pop-total}$):

$$(I_{Availability}^F)_r = \sum_{fg} \frac{1}{fg} \cdot \left(\frac{P_{r,fg}^{prod}}{P_{r,fg}^{dem}} \right) \quad (5.163)$$

La accesibilidad energética es igual a la población total menos la población sin acceso a alimentos ($Pop_m^{NAccessF}$) dividida por la población total:

$$(I_{Accessibility}^F)_r = \frac{Population_r - Pop_r^{NAccessF}}{Population_r} \quad (5.164)$$

La sustentabilidad alimentaria se mide como la relación entre las porciones de alimentos importados y las porciones de alimentos producidos:

$$(I_{Sustainability}^F)_r = \sum_{fg} \frac{1}{fg} \cdot \frac{P_{r,fg}^{dem} - P_{r,fg}^{imp}}{P_{r,fg}^{dem}} \quad (5.165)$$

El índice de seguridad del nexo energía-agua-alimentos es igual a la media aritmética de los indicadores de seguridad de los sectores agua, energía y alimentos:

$$I^{WEF} = (I^{water} + I^{energy} + I^{food}) \times \frac{1}{3} \quad (5.166)$$

Funciones Objetivo: Esquemas de asignación

A menudo, los objetivos económicos reciben más atención que los aspectos ambientales y sociales en la optimización de procesos. Muchos trabajos se han resuelto bajo esquemas de

maximización de la utilidad en los que los individuos buscan alcanzar el mayor nivel de satisfacción asociado a sus decisiones económicas. En el caso del nexo energía-agua-alimentos, no solo se deben considerar los factores económicos. Se requieren nuevos enfoques para cuantificar el estado del nexo e identificar vulnerabilidades. Por ello, en este trabajo se aborda el nexo energía-agua-alimentos a través de un enfoque sistemático que involucra índices de seguridad asociados a los sectores agua, energía y alimentos. Estos índices pueden ser vistos como el interés de los tomadores de decisiones. Los índices propuestos corresponden a la disponibilidad, accesibilidad y sustentabilidad de recursos que se basan en la importación de recursos. El principal objetivo de este trabajo es maximizar el índice agua-energía-seguridad alimentaria bajo diferentes esquemas de asignación.

Una forma útil de generar soluciones que puedan ayudar en la toma de decisiones y abordar una distribución de recursos considerada justa es a través de la implementación de esquemas de asignación (bienestar social (SW), Rawlsian (RW), Rawlsian-Nash (RW-N) y Nash (N)). En este trabajo se propone evaluar los esquemas de asignación para cuantificar el índice de seguridad WEF. Sin embargo, aunque estos enfoques se han aplicado para maximizar los beneficios económicos en los sistemas, también se pueden utilizar como una herramienta de optimización multiobjetivo que se puede aplicar en diferentes contextos, no solo económicos. En el caso del nexo energía-agua-alimentos, se podría optimizar la distribución de los recursos bajo funciones objetivo que representan los enfoques de bienestar social, Rawlsian, Nash y Rawlsian-Nash para tener una medición eficiente y equitativa entre los sectores energía, agua y alimentos. Por lo tanto, los índices de seguridad hídrica, energética y alimentaria son los objetivos de interés del sistema.

El enfoque utilitario conocido como enfoque de bienestar social es el enfoque estándar utilizado en los procesos de optimización que representan las preferencias del tomador de decisiones. El utilitarismo sostiene que una acción es correcta si tiende a producir felicidad, por tanto, su fin es el bienestar de toda la sociedad maximizando el beneficio total (suma de los beneficios de los decisores). Los problemas de optimización del bienestar social se han utilizado comúnmente para abordar aspectos económicos. Por ejemplo, en los problemas de maximización de la utilidad, las utilidades individuales se maximizan sobre todas las asignaciones factibles que satisfacen ciertas restricciones. En este trabajo, a través del

enfoque de bienestar social, se maximizan los índices de seguridad asociados a los sectores agua, energía y alimentos para generar el máximo beneficio que es la seguridad del nexo agua-energía-alimentos (**Ecuación 5.201**). Sin embargo, se pueden encontrar múltiples asignaciones de recursos ya que las soluciones proporcionadas por este esquema pueden no ser únicas y, por lo tanto, este método genera ambigüedad.

$$\phi^{sw} = I^{water} + I^{energy} + I^{food} \quad (5.201)$$

El principio de la diferencia de Rawls establece aproximadamente que la desigualdad debe tolerarse solo cuando mejora la situación de los menos aventajados (Hooker, 2010). El principio de Rawls se resuelve mediante un problema de optimización max-min, esto significa que maximiza el objetivo mínimo (índice de seguridad) para todos los escenarios. Por tanto, la distribución de los recursos debe ser aquella que maximice el índice de seguridad a través de la maximización del sector menos beneficiado. En este trabajo, el objetivo es maximizar el índice de seguridad para cada sector (agua, energía y alimentos), por lo tanto, transformamos el problema incluyendo una variable adicional (Θ) que ahora es un límite para cada una de las variables individuales (índices), entonces el problema de optimización ahora es un problema de minimización con restricciones de desigualdad adicionales (**ecuaciones 5.202-5.205**). De esta forma, el modelo puede maximizar la variable o índice menos aventajado (**Ecuación 5.202**).

$$\phi^{rw} = \Theta \quad (5.202)$$

$$I^{water} \leq \Theta \quad (5.203)$$

$$I^{energy} \leq \Theta \quad (5.204)$$

$$I^{food} \leq \Theta \quad (5.205)$$

La expresión matemática del esquema de asignación de Nash es la maximización de la media geométrica de los objetivos de interés. Esto es equivalente a maximizar la suma de sus logaritmos, entonces, dado que la función logarítmica es estrictamente cóncava, tiene una solución óptima única, lo que significa que no hay asignaciones alternativas que produzcan la misma solución óptima para la función de Nash (Sampat y Zavala, 2019). La asignación

de Nash se obtiene maximizando la suma de los logaritmos de los índices de seguridad hídrica, energética y alimentaria.

$$\phi^n = \ln(I^{water}) + \ln(I^{energy}) + \ln(I^{food}) \quad (5.206)$$

Finalmente, se incluye una combinación de esquemas de Rawlsian-Nash. El esquema de Rawlsian-Nash fue propuesto previamente por Munguía-López et al. (2019) como una herramienta que combina los conceptos del esquema de Rawlsian y Nash. El principio del esquema Rawlsian se basa en el hecho de que las desigualdades deben tolerarse solo cuando se espera que beneficien a los desfavorecidos, esto significa que, en el esquema de asignación Rawlsian, el beneficio máximo debe maximizarse para el interés objetivo menos acomodado. Por otro lado, el esquema de asignación de Nash maximiza el producto de los objetivos de interés, lo que equivale a maximizar la media geométrica de los objetivos de interés, esto equivale a maximizar la suma de los logaritmos de los objetivos, lo que permite capturar la escala del sistema. Una propiedad importante de este esquema es la propiedad de simetría que implica que no hay asignaciones alternativas, el esquema de Nash podría necesitar sacrificar la eficiencia total del sistema, es decir, la suma de las metas de interés para lograr la equidad. Considerando esto, el esquema de asignación de Nash se puede combinar con los conceptos del esquema de Rawls para encontrar una solución que sea tanto eficiente como justa (Munguía-López et al., 2019). La formulación de este esquema es similar al esquema de Rawls porque una nueva variable (Θ) se incluye y se minimiza. Pero en este caso, las restricciones (**Ecuaciones 5.208-5.210**) incluyen la función logaritmo, y se incluye otra para representar el esquema de Nash (**Ecuación 5.211**):

$$\phi^{rw-n} = \Theta \quad (5.207)$$

$$\ln(I^{water}) \leq \Theta \quad (5.208)$$

$$\ln(I^{energy}) \leq \Theta \quad (5.209)$$

$$\ln(I^{food}) \leq \Theta \quad (5.210)$$

$$(\ln(I^{water}) + \ln(I^{energy}) + \ln(I^{food})) \leq \Theta \quad (5.211)$$

El modelo de optimización del nexo agua-energía-alimentos se resuelve bajo diferentes casos asociados a las funciones objetivo, incluyendo los esquemas de bienestar social (SW), Rawlsian (RW), Rawlsian-Nash (RW-N) y Nash (N) en los que el objetivo es maximizar la seguridad del WEF.

5.2.3 Caso de estudio

Para demostrar la aplicabilidad del modelo, se seleccionó como caso de estudio el estado mexicano de Sonora. Sonora ha sido una de las entidades económicas más importantes de México ya que cuenta con una diversidad de recursos naturales que facilitan el desarrollo de actividades económicas como la agricultura, la ganadería, la pesca, la minería y los servicios. Sonora se encuentra en la región norte de México, la región frontera (R1) del estado está cubierta por el Desierto de Sonora, que es el desierto más cálido del país. De lo anterior, se destaca que la entidad cuenta con uno de los niveles más altos de irradiación solar a nivel nacional (6 - 8 kW/h/m²), representando un área con alto potencial para la producción de energía eléctrica a partir de energía solar. Por otro lado, la agricultura en el estado de Sonora es una de las actividades económicas más importantes. Sonora tiene una extensión territorial de 18,484,644 hectáreas, de las cuales el 4.1% se destina al uso agrícola. La agricultura sonorenses predomina en la región sur, la cual se especializa en la producción de granos, oleaginosas y hortalizas. Sin embargo, uno de los principales problemas del estado es que por sus condiciones geográficas e hidrológicas, brindar acceso al agua a los diferentes sectores económicos representa un gran desafío. Por lo tanto, es necesario implementar estrategias para mejorar el desarrollo agrícola del estado. Además, considerando que Sonora tiene potencial de energía renovable, se aborda el diseño de un sistema WEF integrado para aumentar la seguridad del nexo WEF.

En este trabajo, el estado de Sonora se dividió en cuatro regiones representativas (ver **Figura 5.5**) para evaluar la seguridad del nexo WEF; La Región Frontera (R1), Región Centro (R2), Región Centro-Sierra (R3) y Región Sur (R4). Se muestran subdivisiones de las regiones

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

abordadas y representan los municipios del estado, sin embargo, el análisis del nexo WEF fue abordado por región.

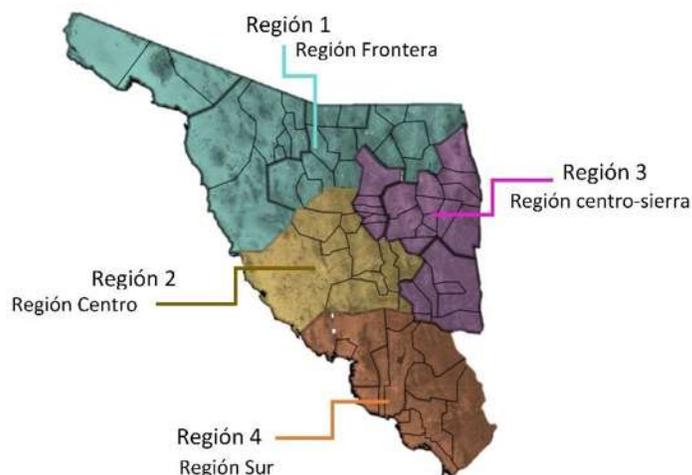


Figura 5. 5 Representación del caso de estudio.

La **Tabla 5.2** presenta los índices de agua, energía y alimentos asociados a la disponibilidad, accesibilidad y sustentabilidad de los recursos actuales. Actualmente, la Región Centro-Sierra (R3) presenta la menor disponibilidad hídrica mientras que la Región Centro (R2) presenta la mayor disponibilidad hídrica del estado; por lo tanto, el agua de R2 se usa para ayudar a satisfacer los requisitos de agua en las regiones cercanas. Por otro lado, se muestra que la producción de energía se concentra en R2, y R3 exhibe la menor producción de energía del estado.

Tabla 5. 2 Índices actuales de seguridad del nexo agua-energía-alimentos.

	Agua			Energía			Alimentos
	$I_{Availability}^W$	$I_{Accessibility}^W$	$I_{Sufficiency}^W$	$I_{Availability}^E$	$I_{Accessibility}^E$	$I_{Sufficiency}^E$	$I_{Accessibility}^F$
R1	0.666	0.981	0.666	0.395	0.988	0.395	0.751
R2	2.127	0.991	1.000	1.377	0.978	1.377	0.751
R3	0.195	0.971	0.195	1.036	0.980	0.141	0.751
R4	1.007	0.958	1.007	0.224	0.970	0.215	0.751

Las regiones de Sonora presentan una distribución desigual de la disponibilidad de recursos y la producción. Se puede observar que R2 presenta la mayor producción de agua y energía, lo que está asociado a su carácter industrializado. Por otro lado, R3 corresponde a la región menos urbanizada del estado, por lo tanto, las tecnologías para la producción de energía no son abundantes. Además, es importante mencionar que esta región no tiene acceso al mar, y la existencia de plantas desalinizadoras que incrementen la producción de agua en la región no es una opción. De acuerdo con la **Tabla 5.2**, R2 tiene los indicadores de disponibilidad, accesibilidad y suficiencia más altos de las regiones del estado. Sin embargo, es importante notar que el potencial de Sonora para la energía renovable se puede explotar, y aumentar la capacidad de energía renovable podría mejorar la seguridad en el sector energético. Del mismo modo, la reutilización del agua y las técnicas de riego podrían mejorar sustancialmente la seguridad del WEF.

Los datos asociados con el modelo se obtuvieron de la literatura y la información disponible en los informes federales. Para el caso de estudio, los datos asociados a la disponibilidad y consumo de agua se obtuvieron de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los datos de electricidad se obtuvieron de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la información de producción de alimentos se obtuvo del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (SIAP). El modelo matemático propuesto está formulado para un horizonte temporal anual debido a que se carece de datos a escalas temporales pequeñas, por lo que futuras investigaciones deberían incluir la producción y el consumo de recursos a escalas temporales pequeñas.

5.3 Discusión de Resultados

La formulación matemática de los esquemas de asignación justa analizados se implementó en el software GAMS. Los modelos de los esquemas corresponden a un Modelo de Programación Mixto Entero Lineal (MINLP) y fueron resueltos utilizando el solver LINDOGlobal. El modelo correspondiente al esquema de bienestar social está compuesto por 5,500 restricciones, 154 variables binarias y 7,900 variables continuas, para el esquema Rawlsian el modelo involucra 5,501 restricciones, 154 variables binarias y ,7906 variables continuas, el modelo Rawlsian-Nash consta de 5,500 restricciones, 154 variables binarias y 7,906 variables continuas, el esquema Rawlsian se compone de 5,501 restricciones y 7,905 variables continuas.

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

La **Tabla 5.3** muestra los costos, el consumo de agua dulce y las GHGE generadas en los diferentes esquemas de asignación. El esquema SW presenta las mayores ganancias. Por otro lado, el esquema Nash presenta la mayor generación de GHGE.

Tabla 5. 3 Aspectos económicos y ambientales de los esquemas de asignación.

	Bienestar social	Rawlsian	Nash	Rawlsian-Nash
Profit (MMUSD)	23,700.00	18,500.00	23,290.00	15,930.00
GHGE (Ton CO₂)	7,805.82	7,053.07	7,994.51	6,452.52

Los resultados del índice de seguridad de agua, energía y alimentos para los esquemas SW, RW, N y RW-N se presentan en la **Tabla 5.4** y **Tabla 5.5**. Cabe mencionar que los índices de seguridad presentados en la **Tabla 5.4** corresponden a los índices del estado ya que son el promedio de los índices de seguridad de las regiones del estado. Por lo tanto, algunos índices de seguridad son mayores a 1, pero no significa que la seguridad de los sectores se haya logrado en su totalidad ya que algunos índices indican que en algunas regiones existen más recursos que los requeridos por la población. Por ejemplo, un valor mayor a 1 para el índice de disponibilidad de energía significa que en la región se produce más energía que la energía demandada, por lo tanto, se podría exportar energía a otras regiones.

Tabla 5. 4 Índice de seguridad WEF para los esquemas analizados.

	Bienestar social	Rawlsian	Nash	Rawlsian-Nash
I^{water}	1.252	0.961	1.273	0.983
I^{energy}	0.756	0.695	0.76	0.698
I^{food}	3.097	2.356	3.032	1.685
I^{WEF}	1.702	1.337	1.688	1.122
Agua				
$I_{Availability}^W$	1.999	1.124	2.056	1.178
$I_{Accessibility}^W$	0.975	0.976	0.975	0.976
$I_{Sufficiency}^W$	0.7820	0.783	0.7890	0.795
Energía				
$I_{Availability}^E$	0.715	0.6420	0.7210	0.649
$I_{Accessibility}^E$	1	0.9500	1.0000	0.950
$I_{Sufficiency}^E$	0.5520	0.4920	0.5590	0.497
Alimentos				
$I_{Availability}^F$	7.623	5.493	7.433	3.45
$I_{Accessibility}^F$	0.9530	0.9510	0.9530	0.98
$I_{Sufficiency}^F$	0.7170	0.6240	0.7100	0.62

Bienestar social. El diagrama de bienestar social (SW) se presenta en la **Figura 5.6**. El diagrama de flujo muestra las tecnologías seleccionadas para cubrir las demandas de agua y energía en las regiones del estado. El esquema de bienestar social tiene la mayor producción de energías renovables debido a la selección de nuevas plantas. La instalación de nuevas plantas solares estuvo determinada por el modelo en las regiones R1, R2 y R3, siendo la región 3 (R3) la de mayor capacidad (**Tabla 5.7**). Por otro lado, se seleccionaron tecnologías de conversión de residuos a energía de diferentes capacidades. El diagrama de flujo muestra que para R1 solo se seleccionaron plantas de gasificación, la región 3 (R3) incluye una planta de incineración y una de gasificación, y en el caso de la región 4 (R4) se seleccionó una planta de digestión anaeróbica.

Los resultados obtenidos en el esquema de bienestar social presentan el índice de Seguridad WEF más alto (1.702) en comparación con los demás esquemas. El índice de seguridad

alimentaria fue superiores a los demás esquemas lo cual se atribuye a que se tiene mayor disponibilidad de los grupos de alimentos. En el caso del sector hídrico, el índice de disponibilidad fue aproximadamente 2% menor en comparación con el esquema Nash que es el esquema con mayor índice de seguridad hídrica y aproximadamente 30% mayor que los esquemas Rawlsian y Rawlsian-Nash.

El esquema SW tiene la mayor generación de emisiones entre los esquemas evaluados. La producción de alimentos que involucra actividades agropecuarias representa el sector con mayor generación de emisiones, seguido por la quema de gas natural para generar electricidad (**Tabla 5.5**). Por otro lado, el proceso de incineración muestra la mayor generación de emisiones de las tecnologías de conversión de residuos en energía.

El estudio de las propiedades axiomáticas del esquema de asignación de beneficio social muestra que su función representativa es una función afín lo que implica que no es única, desde una perspectiva de implementación, una de las desventajas de este esquema es que es difícil computar todas las posibles soluciones que se pueden obtener. Además, también se pueden requerir criterios adicionales para encontrar una asignación óptima de recursos (Sampat y Zavala, 2019). Por otro lado, la capacidad de brindar múltiples soluciones al tomador de decisiones podría ser una ventaja, en este sentido, se podrían agregar restricciones de acuerdo con la necesidad o interés (es decir, costos, consumo de agua y/o generación de emisiones). Sin embargo, desde una perspectiva social, se debe considerar que algunas de las soluciones podrían ser injustas, ya que la maximización del bienestar general puede implicar que se sacrifique el bien de un sector para potenciar los beneficios de otro sector (Stark et al., 2014).

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

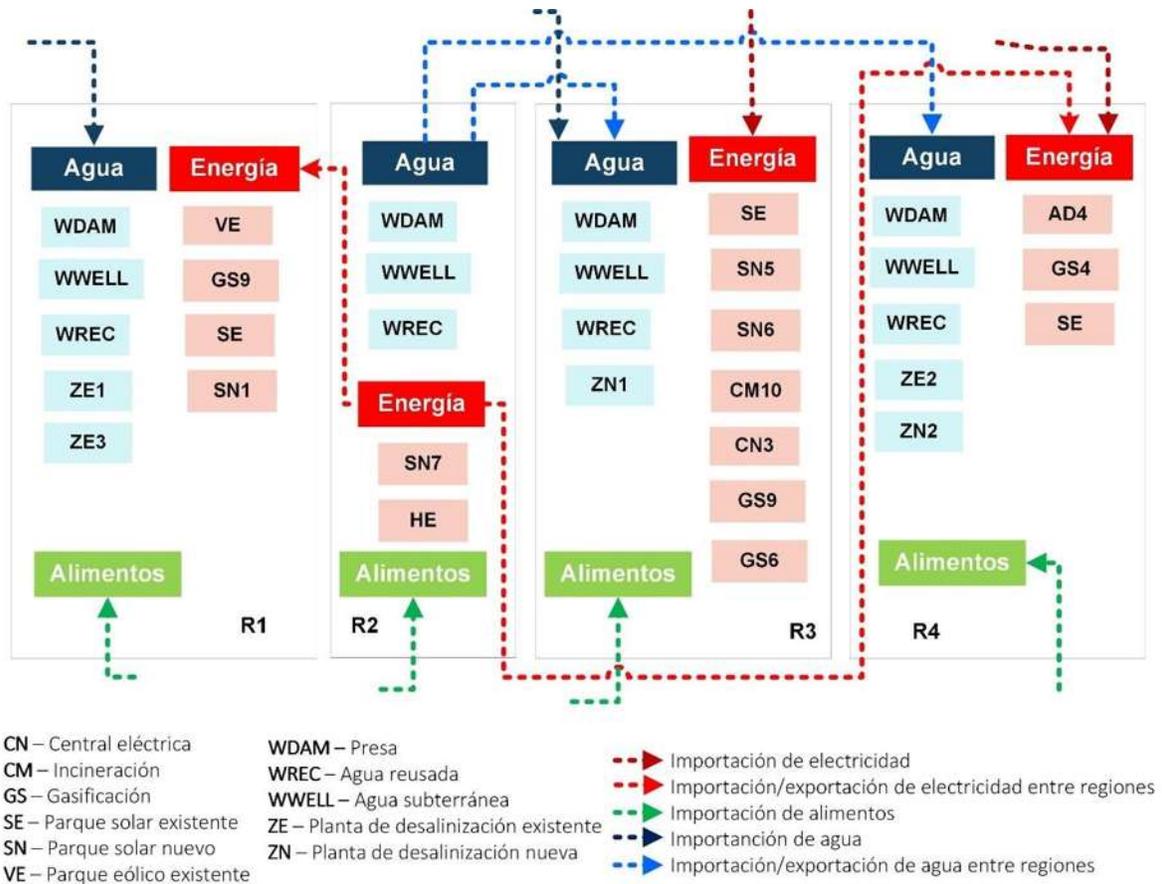


Figura 5. 6 Diagrama de flujo del esquema de bienestar social.

Tabla 5. 5 Emisiones generadas en los esquemas abordados.

	GHGE x 10 ³ (Ton CO ₂)			
	SW	RW	N	RW-N
Aguas residuales	134.985	132.857	135.009	132.817
Gas natural	1572.848	1415.563	1572.848	1415.563
Residuos sólidos municipales	49.361	49.361	210.361	49.361
Producción de alimentos	5599.82	5013.599	5445.191	4413.09
Incineración	69.07	69.07	276.28	69.07
Gasificación	53.587	53.587	26.32	53.587
Tratamiento de agua	287.19	277.286	286.754	277.286

Tabla 5. 6 Capacidad de los procesos instalados en los diferentes esquemas.

Bienestar social		Rawlsian		Rawlsian-Nash		Nash	
Región.Unidad	Capacidad	Región.Unidad	Capacidad	Región.Unidad	Capacidad	Región.Unidad	Capacidad
Capacidad de las centrales eléctricas (MW)							
R3.CN3	477	R3.CN3	429	R3.CN3	429	R3.CN3	477
Capacidad de las plantas de desalinización existentes (l s⁻¹)							
R1.ZE1	200	R1.ZE1	200	R1.ZE1	200	R1.ZE1	200
R1.ZE3	120	R1.ZE3	120	R1.ZE3	120	R1.ZE3	120
R4.ZE2	200	R4.ZE2	200	R4.ZE2	200	R4.ZE2	200
Capacidad de las plantas de desalinización nuevas (l s⁻¹)							
R3.ZN1	200	R3.ZN1	200	R3.ZN1	200	R3.ZN1	200
R4.ZN2	200	R4.ZN2	200	R4.ZN2	200	R4.ZN2	200
Capacidad de las plantas de incineración (Mton msw año⁻¹)							
R3.CM10	50	R3.CM10	50	R3.CM10	50	R1.CM3	150
						R3.CM10	50
Capacidad de las plantas eólicas (MW)							
R1.VE1	2	R1.VE1	2	R1.VE1	2	R1.VE1	2
Capacidad de las plantas de gasificación (Mton msw año⁻¹)							
R1.GS9	250	R1.GS9	250	R1.GS9	250	R3.GS6	241
R3.GS6	241	R3.GS6	241	R3.GS6	241		
Capacidad de los parques solares existentes (MW)							
R1.SE1	110	R1.SE1	110	R1.SE1	110	R1.SE1	110
R1.SE2	99	R1.SE2	99	R1.SE2	99	R1.SE2	99
R1.SE3	180	R1.SE3	180	R1.SE3	180	R1.SE3	180
R1.SE4	137.5	R1.SE4	137.5	R1.SE4	137.5	R1.SE4	137.5
R1.SE5	100	R1.SE5	100	R1.SE5	100	R1.SE5	100
R1.SE6	125	R1.SE6	125	R1.SE6	125	R1.SE6	125
R3.SE7	125	R3.SE7	125	R3.SE7	125	R3.SE7	125
R3.SE8	100	R3.SE8	100	R3.SE8	100	R3.SE8	100
R3.SE9	21.3	R3.SE9	21.3	R3.SE9	21.3	R3.SE9	21.3
R3.SE10	25	R3.SE10	25	R3.SE10	25	R3.SE10	25
R4.SE11	99	R4.SE11	99	R4.SE11	99	R4.SE11	99
R4.SE12	200	R4.SE12	200	R4.SE12	200	R4.SE12	200
R4.SE13	90	R4.SE13	90	R4.SE13	90	R4.SE13	90
Capacidad de los parques solares nuevos (MW)							
R1.SN1	100	R1.SN1	100	R1.SN1	100	R1.SN1	100
R2.SN7	100	R3.SN5	100	R3.SN5	62	R1.SN3	100
R3.SN5	100					R1.SN4	100
R3.SN6	100					R2.SN7	100

Esquema Rawlsian. El diagrama de flujo del esquema Rawlsian (RW) se presenta en la **Figura 5.7**. Este esquema presenta una producción de energía renovable menor que el esquema de bienestar social, sin embargo, se seleccionaron nuevas plantas solares para en las regiones R1 y R3, lo que aumenta la capacidad de energía renovable en comparación con el sistema actual (**Tabla 5.7**). Por otro lado, la tecnología de conversión de residuos en energía seleccionada para R1 fue la planta de gasificación y en R3 se seleccionaron las plantas de incineración y gasificación. Los resultados del diseño del sistema para este esquema muestran un índice de seguridad WEF de 1.337, el cual es 21% inferior al índice de seguridad WEF resultante del esquema SW debido a que se produjo una menor cantidad de recursos. Por otra parte, se logra la accesibilidad de agua para toda la población en las regiones R1 y R2, en el caso de la accesibilidad energética, el exceso de energía eléctrica producida en R2 se envía a otras regiones para aumentar su índice de accesibilidad. En el sector alimentario, cabe señalar que, si bien el índice de disponibilidad muestra que la producción de alimentos es mayor que la demanda, no todos los alimentos producidos en la región alcanzan para cubrir los requerimientos nutricionales de la población, por lo que algunos tipos de alimentos deben importarse para satisfacer los macronutrientes requeridos por la población. La **Tabla 5.7** muestra los alimentos requeridos que cubren los requerimientos nutricionales de la población en los diferentes esquemas.

Los resultados del esquema RW no presentan índices de seguridad tan altos como en el esquema SW, esto se debe a las limitaciones del esquema RW para maximizar los índices de los sectores menos desfavorecidos. Comparando los resultados obtenidos en el esquema RW y la situación actual en Sonora, se observó que bajo el esquema RW los índices de seguridad presentan un incremento de forma más equilibrada, no como en el esquema SW.

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

Tabla 5. 7 Toneladas de alimentos demandadas para cubrir los requerimientos nutricionales de la población en los esquemas de asignación.

	SW	RW	RW-N	N
Avena	29113	31850	76210	24488
Calabacita	23163	23163	23163	23163
Calabaza	67985	67985	67985	67985
Chile	9190	9190	9190	9190
Garbanzo	61309	66210	89906	66277
Maíz	34163	24565	65735	36180
Melón	9157	12872	11862	20256
Papa	44379	64854	64854	44379
Pepino	12438	12438	12438	12438
Sandía	95780	88677	93060	95817
Jitomate	8640	8640	12072	8640
Trigo	29392	32751	32751	30408
Sorgo	33162	36042	60266	33162
Espárrago	89553	135406	230998	86448
Naranja	66312	20408	90375	64584
Nuez	20196	7810	7810	7988
Uva	1400	1400	1594	1400
Frijol	0	0	0	0
Cebolla	2890	1517	2220	2890
Toronja	636	636	496	636
Manzana	204414	204414	307648	204414
Durazno	9653	9653	9653	9653
Carne de res	23205	22391	42714	21401
Leche	136472	136472	156449	136472
Carne de puerco	38028	36434	32851	45214
Pollo	9790	9790	8930	6203
Huevo	12600	15951	16416	12600

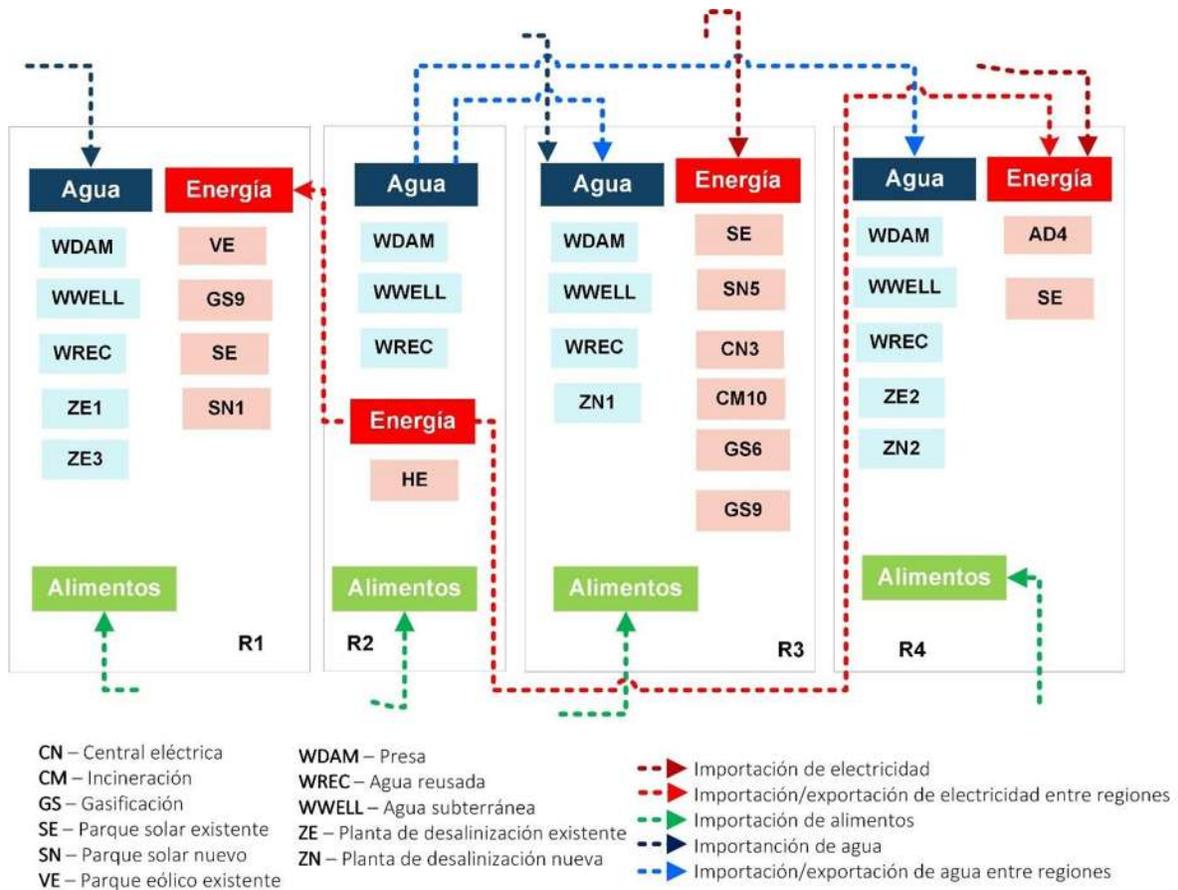


Figura 5. 7 Diagrama de flujo del esquema Rawlsian.

Esquema Rawlsian-Nash. El diseño para el esquema de Rawlsian-Nash está compuesto por plantas de gasificación seleccionadas para R1 y R3, así como la planta de incineración seleccionada en R3 (véase **Figura 5.8**). En este esquema, el modelo seleccionó nuevas plantas solares solo en R1 y R3. Esto provoca que el índice de seguridad energética sea de los más bajos en comparación con los demás esquemas ya que se produce menor energía eléctrica, especialmente energía renovable que hace que el índice de sustentabilidad energética disminuya. Los índices de disponibilidad, accesibilidad y sustentabilidad energética e hídrica son ligeramente mayores bajo el esquema Rawlsian-Nash en comparación al esquema Rawlsian. Respecto al sector alimentario, el índice de disponibilidad de alimentos es el índice más bajo en comparación con los otros esquemas.

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

El índice de seguridad WEF en este esquema es el más bajo de los esquemas de asignación abordados, es igual a 1.122 y es 34% inferior al índice de seguridad WEF resultante del esquema SW.

Sin embargo, es importante mencionar que con la formulación RW-N se podría brindar una solución única, a diferencia del esquema de SW y RW. Las limitaciones de la formulación del esquema RW-N orientan la asignación de recursos para incrementar los índices de seguridad considerando tanto la eficiencia como la equidad, que es el principal atributo de este esquema. Como se puede observar en la **Figura 5.7** y **Figura 5.8**, los resultados del esquema de Rawlsian-Nash y del esquema de Rawlsian son similares, aunque difieren principalmente en el índice de disponibilidad de alimentos, siendo mayor en el esquema Rawlsian.

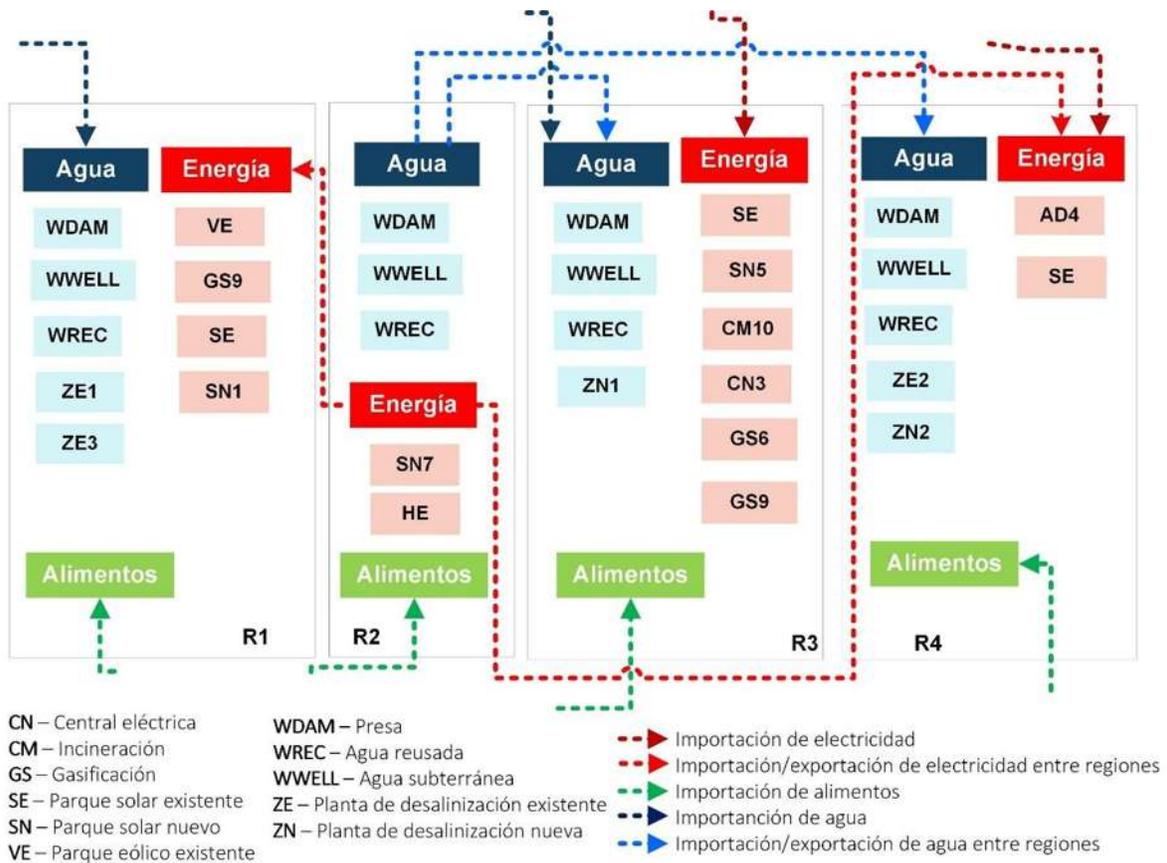


Figura 5. 8 Diagrama de flujo del esquema Rawlsian-Nash.

Esquema Nash. El diagrama de flujo de Nash se presenta en la **Figura 5.9**. En este esquema, se tiene la mayor generación de energía a través de energía renovable. Se seleccionaron dos nuevas plantas de energía solar para el sistema en R1, R2 y R3. Además, se seleccionaron tecnologías de conversión de residuos en energía;

Se incluyó una planta de gasificación en R1 y R3 de diferentes capacidades para el tratamiento de residuos sólidos urbanos. Además, se seleccionaron dos plantas de incineración para R1 y R3. Por otra parte, al igual que en los cuatro esquemas abordados, se considera una central existente en R3 utiliza gas natural como combustible fósil (376 MMcm).

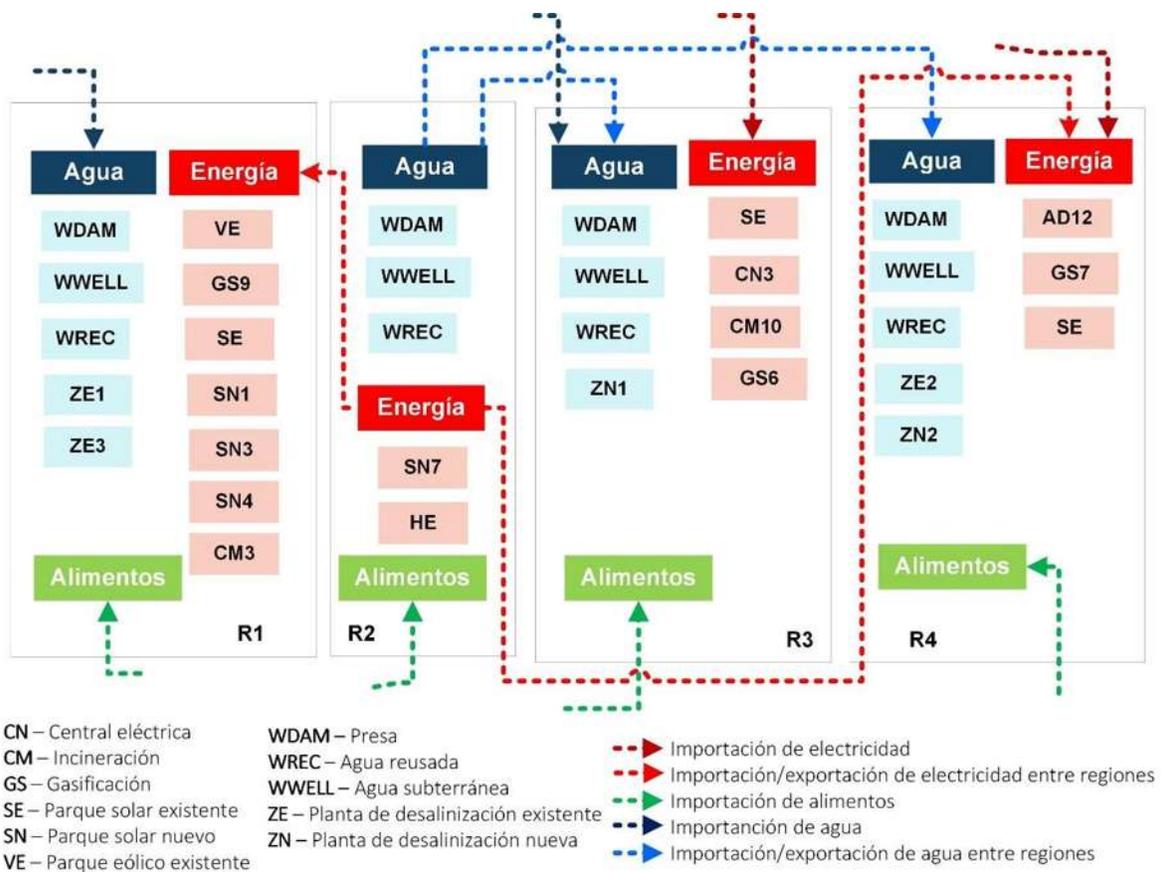


Figura 5. 9 Diagrama de flujo del esquema Nash.

Para el esquema de Nash, en el sector agua, se observa que R2 produce más agua que la demanda en la región (**Tabla 5.8**), por lo tanto, no existen importaciones internas de agua entre las regiones, y el índice de disponibilidad de agua es mayor que los demás esquemas.

CAPÍTULO 5. UN MARCO DE NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS BASADO EN LA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE RECURSOS

A pesar de que se tiene una mayor producción de agua bajo este esquema, el índice de accesibilidad al agua es igual a uno solo para las regiones R3 y R4, mientras que para R1 y R2 la producción de agua es suficiente para cubrir los requerimientos hídricos de la población. Por otro lado, la accesibilidad alimentaria para toda la población no se logró en completamente en las cuatro regiones y la sustentabilidad alimentaria presenta los índices más bajos de las regiones evaluadas debido a que se requiere importar más alimentos para cubrir los requerimientos nutricionales de la población. Los índices de accesibilidad al agua, la energía y los alimentos podrían fijarse a 1 obligando al modelo a servir a todas las personas. Sin embargo, por la forma en que se definieron los índices, es posible que en las regiones con suficiente disponibilidad de recursos, los excedentes de recursos sean exportados para satisfacer la demanda de recursos necesarios para dar acceso a la población total de las demás regiones, lo que tendería a disminuir el índice de sustentabilidad y en consecuencia el índice de seguridad WEF. El índice WEF para el esquema de Nash es igual a 1.688, con índices de seguridad del sector hídrico y energético ligeramente mayores que el esquema de beneficio social. Debido a las propiedades de la función matemática para el esquema de Nash, los resultados corresponden a un modelo eficiente y único.

La implementación de nuevas tecnologías en el sistema WEF traerá beneficios sociales; sin embargo, su implementación dependerá de los tomadores de decisiones como el gobierno que tiene que invertir en estas tecnologías para hacer una mejor gestión de los recursos. Además, considerando que a través de este enfoque la planificación del nexo WEF y la distribución de recursos está guiada por la maximización de la seguridad de los recursos, lo que implica nuevas alternativas para incrementar la producción de recursos de manera sostenible, se espera que para otros casos se mejorará la seguridad del nexo porque hoy en día existen diferentes alternativas de producción sostenible.

Tabla 5. 8 Índice de seguridad WEF por región para los diferentes esquemas analizados.

	Agua			Energía			Alimentos		
	I _{availability}	I _{accessibility}	I _{sufficiency}	I _{availability}	I _{accessibility}	I _{sufficiency}	I _{availability}	I _{accessibility}	I _{sufficiency}
SW									
R1	0.854	0.95	0.954	0.389	1	0.389	1.846	0.95	0.68
R2	5.866	0.95	1	1.449	1	1.449	15.07	0.95	0.723
R3	0.197	1	0.297	0.881	1	0.231	3.263	0.961	0.639
R4	0.979	1	0.979	0.141	1	0.141	10.30	0.95	0.825
RW									
R1	0.825	1	0.825	0.397	0.95	0.397	1.767	0.95	0.474
R2	2.365	1	1	1.225	0.95	1.225	8.713	0.95	0.655
R3	0.308	0.95	0.308	0.797	0.95	0.198	3.02	0.956	0.578
R4	1	0.954	1	0.149	0.95	0.149	8.295	0.95	0.791
N									
R1	0.869	0.95	0.869	0.425	1	0.425	1.759	0.95	0.68
R2	6.066	0.95	1	1.515	1	1.515	14.43	0.95	0.723
R3	0.308	1	0.308	0.804	1	0.155	3.23	0.961	0.634
R4	0.979	1	0.979	0.141	1	0.141	10.30	0.95	0.801
RW-N									
R1	0.848	1	0.848	0.399	0.95	0.399	0.969	0.95	0.525
R2	2.53	1	1	1.253	0.95	1.253	6.395	1	0.619
R3	0.334	0.95	0.334	0.794	0.95	0.186	1.888	0.965	0.554
R4	1	0.953	1	0.1149	0.95	0.149	4.563	1	0.794

5.4 Conclusiones

Estudiar las interconexiones de agua, energía y alimentos es esencial para el diseño de sistemas y la asignación de recursos para mejorar la seguridad del nexo energía-agua-alimentos. Este artículo ha presentado un marco de referencia para la optimización del nexo energía-agua-alimentos mediante la maximización de la seguridad del nexo considerando diferentes esquemas de asignación, que apoyan la toma de decisiones para una mejor gestión de los recursos y el desempeño de los sectores. Como caso de estudio, se utilizaron regiones del estado de Sonora de México para probar el modelo propuesto. El marco se resolvió considerando diferentes esquemas de asignación, como el bienestar social, los esquemas de Rawlsian, Nash y Rawlsian-Nash para obtener la asignación óptima de recursos que maximiza la seguridad del nexo energía-agua-alimentos. Mediante la aplicación del enfoque propuesto, los resultados muestran un incremento en el índice de seguridad del sector agua del 20%, 57% del sector energía y 26% del sector alimentos. Esto da un incremento del 27% en el índice de seguridad WEF utilizando el esquema de beneficio social, que es el índice

más alto entre los esquemas evaluados. Los resultados para el diseño del esquema Nash presentan la mayor generación de emisiones (7,994.51 ton CO₂) entre los diferentes esquemas de asignación, y un índice de seguridad WEF de 1.688. Por otro lado, el esquema Rawlsian-Nash presenta las menores ganancias (\$15,930 MMUSD), el menor consumo de agua dulce (4,833.46 hm³) y el menor índice de seguridad WEF (1.122).

Este trabajo puede verse como un paso hacia el apoyo a los planificadores sociales o gobiernos que toman decisiones utilizando funciones de elección social que se optimizan automáticamente para sus necesidades. Los métodos de asignación abordados pueden brindar soluciones eficientes y equitativas, y la selección del método de asignación para un sistema en cualquier región dependerá del criterio del tomador de decisiones. Por ejemplo, al aplicar el esquema de bienestar social, se maximizará la suma de los índices de seguridad asociados a los sectores de agua, energía y alimentos para mejorar el índice de seguridad del nexo. Sin embargo, este método podría proporcionar múltiples soluciones que den como resultado el mismo índice de seguridad de nexo. Además, el uso de este método podría conducir a la desigualdad entre la mejora de los sectores de agua, energía y alimentos, ya que no puede capturar tamaños de indicadores de seguridad. Para superar estas limitaciones, se pueden utilizar los enfoques de Rawlsian y Nash. El enfoque Rawlsian será adecuado si el tomador de decisiones desea maximizar la seguridad del nexo maximizando la seguridad del sector más vulnerable y brindará un mayor beneficio a los menos favorecidos de los sectores. Por otro lado, el enfoque de Nash identificará una solución única donde los sectores evaluados se maximizarán juntos. Además, este esquema dará una solución que captura los tamaños de los indicadores de seguridad.

La principal contribución del marco propuesto es el desarrollo de un modelo que proporciona la asignación óptima de agua, energía y alimentos y cuantifica y maximiza la seguridad de los sectores de agua, energía y alimentos. El marco del nexo agua-energía-alimentos propuesto se puede aplicar a cualquier región a cualquier escala con los datos correspondientes. No obstante, una de las principales limitaciones del modelo es la incertidumbre relacionada con la falta de dimensión temporal que impacta en la producción y consumo de recursos y la incertidumbre relacionada con los cambios demográficos y las condiciones meteorológicas.

Conclusiones generales

En este trabajo de tesis se desarrollaron estrategias para evaluar la seguridad del nexo energía-agua-alimentos y su implementación en modelos de optimización para determinar el diseño de sistemas macroscópicos en base a distintos intereses que permitan guiar la toma de decisiones. En años anteriores, las interrelaciones entre el agua, energía y alimentos no tomaron suficiente importancia y era común que la planificación en sistemas macroscópicos se estudiara para cada uno de los sectores por separado, ahora, el nexo energía-agua-alimentos es esencial para el desarrollo de sistemas sostenibles y para orientar políticas para el buen funcionamiento y manejo de los sistemas. Los modelos de optimización desarrollados permiten reconocer que las decisiones que se tomen tendrán repercusiones en todos los sectores y actores involucrados. Por lo tanto, se deben establecer los intereses de los sectores para determinar qué prioridad se les asignará para la toma de decisiones. Este tipo de decisiones son subjetivas y se ven afectadas por quienes toman las decisiones y las consideraciones realizadas. Al usar las estrategias y modelos de optimización desarrollados es posible obtener información útil sobre un sistema antes de su implementación real, por ejemplo, se puede conocer el diseño del sistema por medio de las tecnologías que lo componen, la interacción entre los recursos involucrados, la localización de las tecnologías y su capacidad. Esta información es valiosa ya que al conocer las características del sistema se pueden conocer las implicaciones y consecuencias que conlleva tal sistema y además se pueden evitar gastos innecesarios respecto a la infraestructura. Por otra parte, las metodologías incorporadas a los modelos de optimización presentados permiten encontrar el mejor diseño de un sistema en base a los intereses que se deseen, los cuales pueden ser de carácter económico, ambiental, social o una combinación de ellos y pueden basarse también en el tipo de distribución de recursos de acuerdo a como el interesado considere justo.

Es importante considerar que a pesar de que los modelos de optimización desarrollados proporcionan información valiosa, llevan asociados distintas simplificaciones o suposiciones que pueden alejarnos de una solución real o exacta, por ejemplo, la escala temporal y los parámetros ambientales involucrados, sin embargo, pueden adaptarse a la escala temporal deseada y pueden aplicarse para estudiar cualquier caso de estudio.

Apéndice A. Material suplementario

En este apéndice se presentan datos relacionados a los casos de estudio.

Capítulo 3

Tabla 1a. Disponibilidad, generación e importación de agua, energía y alimentos en Sonora.

Año	Total de agua Generada	Consumo Total de Agua	Población	Total de Población sin acceso a agua	Cantidad de agua importada	Capacidad Total de energía	Consumo Total de Energía	Población total	Total de Población sin acceso a energía	Huella energética	Energía de fuentes no renovables	Promedio Energía consumida en una dieta	Promedio Energía requerida en una dieta	Población desnutrida	Total de cereales consumidos	Importación de cereales
2013	6446700	6612000	2851462	96379	1160406	11344	63512	2851462	79841	63512	63422	2900	2690	998012	654411	101444
2015	6886460	7027000	2932821	73321	1308427	10337	71924	2932821	55724	71924	71674	2900	2690	938503	694140	115588
2019	7335917	7478760	3088524	3089	1393824	18313	89054	3088524	37062	89054	88513	2900	2690	926557	769809	148171
2025	7391529	7990843	3300000	3300	1552221	21976	93507	3300000	28050	93507	78406	2900	2690	891000	887214	190480
2030	7409691	8232990	3400000	3400	1630132	27470	98183	3400000	20400	98183	77859	2900	2690	838780	958927	237897

Tabla 2a. Índices de seguridad del nexo energía-agua-alimentos.

Año	W-1	W-2	W-3	E-1	E-2	E-3	F-1	F-2	F-3
2013	-0.0256	0.9662	0.8245	-4.5989	0.9720	0.0014	0.0724	0.6500	0.8450
2015	-0.0204	0.9750	0.8138	-5.9582	0.9810	0.0035	0.0724	0.6800	0.8335
2019	-0.0195	0.9990	0.8136	-3.8629	0.9880	0.0061	0.0724	0.7000	0.8075
2025	-0.0811	0.9990	0.8058	-3.2550	0.9915	0.1615	0.0724	0.7300	0.7853
2030	-0.1111	0.9990	0.8020	-2.5742	0.9940	0.2070	0.0724	0.7533	0.7519

Capítulo 4

Tabla 3a. Residuos sólidos municipales generados en la Comarca Lagunera.

	Municipio	Residuos sólidos municipales (Ton/año)			
		Total	Orgánico	Papel	Plástico
1	Torreón	557016.16	410913.56	82182.71	63919.89
2	Matamoros	89339.00	65905.82	13181.16	10252.02
3	San Pedro de las Colonias	87036.44	64207.21	12841.44	9987.79
4	Francisco I. Madero	47855.20	35303.02	7060.60	5491.58
5	Viesca	17670.18	13035.38	2607.08	2027.73
6	Gómez Palacio	280674.52	207054.97	41410.99	32208.55
7	Lerdo	125715.02	92740.59	18548.12	14426.31
8	Tlahualilo de Zaragoza	18773.90	13849.60	2769.92	2154.38
9	Mapimí	21731.64	16031.54	3206.31	2493.79
10	San Pedro del Gallo	1211.96	894.07	178.81	139.08
11	San Luis Cordero	1703.14	1256.41	251.28	195.44
12	Rodeo	11114.28	8199.06	1639.81	1275.41
13	Nazas	10624.74	7837.92	1567.58	1219.23
14	Cuencamé de Ceniceros	29040.30	21423.17	4284.63	3332.49
15	General Simón Bolívar	8290.20	6115.72	1223.14	951.33
16	San Juan de Guadalupe	4562.48	3365.76	673.15	523.56

Tabla 4a. Recarga natural en presas.

Presa	Capacidad (hm ³)	Recarga Natural
Lázaro Cárdenas	2873	1200
Francisco Zarco	309	223

Tabla 5a. Capacidad de las centrales eléctricas.

Central eléctrica	Capacidad (MW)
Guadalupe Victoria	320
La Laguna	538
Gómez Palacio	240
Parque solar	754

Capítulo 5

Tabla 6a. Datos asociados al alimento involucrado en el caso de estudio.

Tipo de alimento	Requerimiento de agua [1]	Energía requerida [2]	Emissiones generadas [3]	Costo de alimentos importados [4]	Costo de alimentos producidos [4]	Costo de venta de alimentos [4]
	(hm ³ agua / Mton)	(GWh /Mton)	(Mton CO ₂ / Mton alimentos)	(mmusd \$/MT alimentos)	(mmusd \$/MTon alimentos)	(mmusd \$ /MTon alimentos)
Avena	0.482	2.0557E-09	1.4	0.0423	0.0344	0.0412
Calabacita	0.103	1.0279E-09	0.2	0.4097	0.3331	0.3997
Calabaza	0.113	1.0279E-09	0.2	0.5358	0.4356	0.5228
Chile	0.103	7.5006E-10	0.2	0.5856	0.4761	0.5713
Garbanzo	0.397	2.4724E-09	1.1	0.7876	0.6404	0.7684
Maíz	0.216	2.0557E-09	0.5	0.2222	0.1807	0.2168
Melón	0.154	1.9446E-09	0.4	0.3408	0.2771	0.3325
Papa	0.059	1.2779E-09	0.2	0.4612	0.3750	0.4500
Pepino	0.103	7.5006E-10	0.2	0.3997	0.3250	0.3900
Sandía	0.154	1.9446E-09	0.4	0.2482	0.2018	0.2421
Jitomate	0.37	1.5001E-09	0.7	0.3577	0.2908	0.3489
Trigo	0.648	2.0557E-09	0.8	0.2422	0.1969	0.2363
Sorgo	0.648	2.0557E-09	0.8	0.2221	0.1806	0.2167
Espárrago	0.028	8.8896E-10	0.2	2.2856	1.8583	2.2299
Naranja	0.083	1.889E-09	0.3	0.2174	0.1767	0.2121
Nuez	4.134	9.723E-10	2.1	5.2095	4.2353	5.0824
Uva	0.42	9.723E-10	0.7	1.6458	1.3380	1.6057
Frijol	0.397	2.4724E-09	1.1	0.8392	0.6823	0.8187
Cebolla	0.014	1.0279E-09	0.2	0.6433	0.5230	0.6276
Toronja	0.083	1.889E-09	0.3	0.2952	0.2400	0.2880
Manzana	0.18	9.723E-10	0.2	0.6919	0.5625	0.6750
Durazno	0.154	9.723E-10	0.4	0.5580	0.4537	0.5444
Carne de res	2.714	1.1112E-08	15.7	4.3450	3.5325	4.2390
Leche	0.628	1.389E-09	1.5	0.4920	0.4000	0.4800
Carne de puerco	1.796	1.1112E-08	1.7	2.2484	1.8280	2.1936
Pollo	0.628	9.723E-09	0.7	1.8450	1.5000	1.8000
Huevo	0.578	5.0004E-09	1.3	1.3530	1.1000	1.3200

[1] Ourworldindata, 2018. Freshwater withdrawals per kilogram of food product. <https://ourworldindata.org/grapher/water-withdrawals-per-kg-poore> (accessed 8.14.22)

[2] Sranacharoenpong, K., 2020. The environmental impacts of 12 country-specific food-based dietary guidelines. *Journal of Public Health*, 28(6), 719-727.

[3] Ourworldindata, 2018. Environmental impacts of food production. <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food>. (accessed 8.14.22)

[4] SIAP. 2021. Statistical Yearbook of Agricultural Production. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>. (accessed 8.14.22)

Tabla 7a. Parámetros usados en el modelo.

Parámetros		Unidades	Referencia
Eficiencia de la planta desaladora	0.45	(hm^3 agua desalada / hm^3 agua de mar)	Wilder et al., 2016
Coste fijo de la planta desalinizadora	0.35	(mmusd \$/ hm^3)	World Bank, 2019
Coste variable de la planta desalinizadora	0.3	(mmusd \$/ hm^3)	World Bank, 2019
Costo de operación planta desalinizadora	0.07	(mmusd \$/ hm^3)	World Bank, 2019
Eficiencia de los paneles solares	0.17		Energysage, 2022
Coste fijo del sistema Fotovoltaico	24.12	(mmusd \$/ GWh)	IEA, 2022
Costo de operación de la energía hidroeléctrica	0.75	(mmusd \$/ GWh)	IEA, 2022
Factor de eficiencia energética de la planta de incineración	0.34	(electricidad producida GWh / Mton msw)	Ng et al., 2014
Factor de eficiencia energética de la planta de gasificación	1	(electricidad producida GWh / Mton msw)	Ng et al., 2014
Factor de eficiencia energética de la planta de digestión anaeróbica	0.1015	(biogas hm^3 / Mton msw)	Achina et al., 2017
Costo fijo de la planta de Incineración	0.1423	(mmusd \$)/ Mton msw	Ng et al., 2014
Costo variable de la planta de Incineración	0.0057	(mmusd \$)/ Mton msw	Ng et al., 2014
Coste fijo de la planta de gasificación	0.4840	(mmusd \$)/ Mton msw	Chanthakett et al., 2021
Coste variable de la planta de gasificación	0.0194	(mmusd \$)/ Mton msw	[10]
Coste fijo de la planta de digestión anaeróbica	0.2334	(mmusd \$)/ Mton msw	Ng et al., 2014
Coste variable de la planta de digestión anaeróbica	0.0093	(mmusd \$)/ Mton msw	Ng et al., 2014
GHGE gasificación	0.10907	(Mton CO_2 / Mton msw)	Chanthakett et al., 2021
GHGE relleno sanitario	1.62	(Mton CO_2 / Mton msw)	Chanthakett et al., 2021
GHGE digestión anaeróbica	0.125	(Mton CO_2 / Mton msw)	Chanthakett et al., 2021]
GHGE incineración	1.3814	(Mton CO_2 / Mton msw)	Chanthakett et al., 2021

Tabla 8a. Clasificación de municipios por región.

Región 1	Región 2	Región 3	Región 4
Agua Prieta	Aconchi	Álamos	Carbó
Altar	Arivechi	Bácum	Hermosillo
Átil	Arizpe	Benito Juárez	La Colorada
Bacoachi	Bacadéhuachi	Cajeme	Mazatán
Benjamín Hill	Bacanora	Empalme	Opodepe
Caborca	Bacerac	Etchojoa	Rayón
Cananea	Banamichi	Guaymas	San Javier
Cucurpe	Baviácora	Huatabampo	San Miguel de Horcasitas
Fronteras	Bavispe	Navojoa	San Pedro de la Cueva
General Plutarco Elías Calles	Cumpas	Quiriego	Ures
Ímuris	Divisaderos	Rosario	Villa Pesqueira
Magdalena	Granados	San Ignacio Río Muerto	
Naco	Huachinera	Suaqui Grande	
Nacozari de García	Huásabas		
Nogales	Huépac		
Oquitoa	Moctezuma		
Pitiquito	Nácori Chico		
Puerto Peñasco	Ónavas		
San Luis Río Colorado	Sahuaripa		
Santa Ana	San Felipe de Jesús		
Santa Cruz	Soyopa		
Sáric	Tepache		
Trincheras	Villa Hidalgo		
Tubutama	Yécora		

Tabla 9a. Localización de nuevas tecnologías seleccionadas.

ZN1	Hermosillo	GS12	Magdalena
ZN2	Huatabampo	CM1	Agua Prieta
SN1	San Luis Rio Colorado	CM2	Álamos
SN2	Puerto Peñasco	CM3	Caborca
SN3	Agua Prieta	CM4	Cajeme
SN4	Nogales	CM5	Cananea
SN5	Ures	CM6	Hermosillo
SN6	La Colorada	CM7	Navojoa
SN7	Arizpe	CM8	Nogales
SN8	Cajeme	CM9	Puerto Peñasco
GS1	Agua Prieta	CM10	Rayón
GS2	Álamos	CM11	Ures
GS3	Caborca	CM12	Empalme
GS4	Cajeme	CM13	Magdalena
GS4	Cananea	AD1	Hermosillo
GS5	Hermosillo	AD2	Cajeme
GS6	Navojoa	AD3	Álamos
GS7	Nogales	AD4	Quiriego
GS8	Puerto Peñasco	AD5	Rosario
GS9	Rayón	AD6	Guaymas
GS10	Ures	AD7	Caborca
GS11	Empalme		

Apéndice B. Nomenclatura

Nomenclatura del Capítulo 4

Sets

a	Conjunto referente a los acuíferos.
c	Conjunto referente a los diferentes tipos de alimentos.
d	Conjunto referente a las presas.
e	Conjunto referente a las centrales eléctricas.
i	Conjunto referente a las plantas de tratamiento de agua existentes.
j	Conjunto referente a las plantas de tratamiento de agua nuevas.
k	Conjunto referente a las plantas de digestión anaeróbica.
l	Conjunto referente a los tipos de ganado.
m	Conjunto referente a los municipios.
n	Conjunto referente a la localización de tecnologías.
r	Conjunto referente a los tipos de residuos sólidos municipales.
w	Conjunto referente a los pozos.

Variables binarias

y_k^{ad}	Variable binaria asociada a las plantas de digestión anaeróbica.
y_n^{gas}	Variable binaria asociada a la existencia de nuevas plantas de gasificación.
y_j^{gwnew}	Variable binaria asociada a la existencia de nuevas plantas de tratamiento de agua.
$y_{r,n}^{rec}$	Variable binaria asociada a la existencia de plantas de reciclaje.
y_m^{land}	Variable binaria asociada a los rellenos sanitarios.

Variables

a_c^{agr}	Área de cultivos en el sector agrícola (m^2).
a^{Tagr}	Área destinada a agricultura (m^2).
CC	Costo de capital (\$USD).
$ccost^{ad}$	Costo de capital de la planta de digestión anaeróbica (\$USD).
$ccost^{gas}$	Costo de capital de la planta de gasificación (\$USD).
$ccost^{gw}$	Costo de capital de la planta de tratamiento de agua (\$USD).
$ccost^{land}$	Costo de capital de los rellenos sanitarios (\$USD).
$ccost^{rec}$	Costo de capital de la planta de reciclaje (\$USD).
$COST$	Costo de capital total(\$USD).
cr_c^{agr}	Cultivos (Ton).
e^{agr}	Electricidad para el sector agrícola (kWh).
e^{dom}	Electricidad para el sector doméstico (kWh).

e^{grid}	Electricidad total de centrales eléctricas (kWh).
e_e^{grid-e}	Electricidad producida en cada central eléctrica (kWh).
e^{ind}	Electricidad para el sector industrial (kWh).
e^{solar}	Electricidad generada en el parque solar (kWh).
e^{waste}	Electricidad para el manejo de residuos sólidos municipales (kWh).
$emissions^{energy}$	Emisiones generadas en sector eléctrico (Ton).
$emissions^{gas}$	Emisiones generadas en las centrales eléctricas (Ton).
$emissions^{ind}$	Emisiones generadas en el sector industrial (Ton).
$emissions^{lives}$	Emisiones generadas en el sector ganadero (Ton).
$emissions^{land}$	Emisiones generadas los rellenos sanitarios (Ton).
$emissions^{rec}$	Emisiones generadas en las plantas de reciclaje (Ton).
$emissions^{transport}$	Emisiones generadas por el transporte de msw (Ton).
f^{biogas}	Biogás generado en los rellenos sanitarios (m ³).
$f^{biogasg}$	Biogás generado en las plantas de gasificación (m ³).
$f^{biogas-e}$	Biogás generado en vertedero enviado a las centrales (m ³).
$f^{biogasg-e}$	Biogás generado en la planta de gasificación enviado a las centrales (m ³).
$f^{biogas-s}$	Venta de biogás generado en vertedero (m ³).
$f^{biogasg-s}$	Venta de biogás generado en la planta de gasificación (m ³).
$f^{biogasman}$	Biogás generado en la planta de digestión anaeróbica (m ³).
$f^{biogasman-s}$	Venta de biogás generado en la planta de digestión anaeróbica (m ³).
$f^{fert-man}$	Fertilizante generado (Ton)
FO	Funciones objetivo
f^{ng}	Compra de gas natural para la producción de electricidad (m ³).
f^{fuel}	Combustible
GHGE	Emisiones de gases de efecto invernadero (Ton).
$g_{r,m}^{gas}$	MSW enviados a las plantas de gasificación (Ton).
$g_{r,m,n}^{gasn}$	MSW generados en el municipio m enviado a la planta de gasificación ubicada en n (Ton).
$g_{r,m}^{land}$	MSW enviados al relleno sanitario (Ton).
$g_{r,m}^{recycle}$	MSW enviados a las plantas de reciclaje (Ton).

$g_{r,m,n}^{recn}$	MSW generados en el municipio m enviado a la planta de reciclaje ubicada en n (Ton).
$g_{r,m}^{rec-reclaimed}$	MSW recuperados (Ton).
$head_l$	Número de cabezas en el sector ganadero.
$head_l^{meat}$	Número de cabezas para la venta de carne.
$head_l^{sub}$	Número de cabezas para producción de huevos o leche.
$manure$	Estiércol generado por bovino (Ton).
$manure_k^{treat}$	Estiércol enviado a la planta de digestión anaeróbica (Ton).
OC	Costos de operación (\$USD).
$ocost^{gas}$	Costo de operación de la planta de gasificación (\$USD).
$ocost^{land}$	Costo de operación del vertedero (\$USD).
$ocost^{ng}$	Costo de operación del gas natural (\$USD).
$ocost^{rec}$	Operación Costo de reciclaje (\$USD).
$ocost^{transport}$	Operación Costo de transporte de RSU (\$USD).
$ocost^{water}$	Operación Costo del agua (\$USD).
SLS	Ventas (\$USD).
v_k^{ad}	Capacidad de la planta de digestión anaeróbica.
v_n^{gas}	Capacidad de la planta de gasificación.
v_e^{grid}	Capacidad de la planta de energía.
v_j^{gw-new}	Capacidad de las nuevas estaciones depuradoras de aguas residuales.
$v_{r,n}^{rec}$	Capacidad de la planta de reciclaje.
$v_i^{treatment}$	Capacidad de la planta de tratamiento de aguas residuales existente.
ven^{crop}	Ventas de cultivos (\$USD).
ven^e	Ventas de electricidad (\$USD).
ven^f	Ventas de combustible (\$USD).
ven^{fert}	Ventas de fertilizante (\$USD).
ven^{meat}	ventas de carne (\$USD).
ven^{rec}	Venta de residuos valorizados (\$USD).
ven^{sub}	Venta de leche y huevos. (\$USD).
ven^w	Ventas de agua (\$USD).

W_a^A	Agua en acuíferos (hm ³).
W^{agr}	agua para la agricultura (hm ³).
$W_{a,w}^{a-w}$	Agua extraída de acuíferos para pozos (hm ³).
WATER	Agua consumida (hm ³).
W_d^{dam}	Agua en presas (hm ³).
$W_d^{dam-agr}$	Agua de represas enviada al sector agropecuario (hm ³).
$W_d^{dam-grid}$	Agua de represas a centrales eléctricas (hm ³).
$W_d^{dam-ind}$	Agua de embalses al sector industrial (hm ³).
$W_d^{dam-lives}$	Agua de presas para el ganado (hm ³).
$W_{d,m}^{dam-m}$	Agua de represas enviada a municipios (hm ³).
$W_d^{dam-waste}$	Agua de represas a tecnologías de conversión de residuos en energía (hm ³).
W_m^{dom}	Agua enviada al sector doméstico (hm ³).
$W_{m,i}^{gwex}$	Agua enviada a las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes (hm ³).
$W_{m,j}^{gnew}$	Agua enviada a nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales (hm ³).
W^{ind}	Agua enviada al sector industrial (hm ³).
W^{lives}	agua para el ganado (hm ³).
$W_m^{reclaimed}$	Agua recuperada (hm ³).
$W_i^{reclaimed-i}$	Agua recuperada de plantas de tratamiento de agua existentes (hm ³).
$W^{reclaimed-ind}$	Agua regenerada de nuevas depuradoras para sector industrial (hm ³).
$W_j^{reclaimed-new}$	Agua recuperada de nuevas plantas de tratamiento de agua (hm ³).
W_w^{well}	Agua proveniente d pozos (hm ³).
$W_w^{well-agr}$	Agua de pozos para el sector agrícola (hm ³).
$W_w^{well-grid}$	Agua de pozos a las centrales eléctricas (hm ³).
$W_w^{well-ind}$	Agua de pozos para el sector industrial (hm ³).
$W_w^{well-lives}$	Agua de pozos al sector ganadero (hm ³).
$W_{w,m}^{well-m}$	Agua de pozos al sector doméstico (hm ³).
$W_w^{well-waste}$	Agua de pozos a las tecnologías de conversión de residuos en energía (hm ³).
W^{waste}	Agua utilizada para la gestión de msw (hm ³).

Parámetros

A^{agr}	Área total para la agricultura (m^2).
$A_n^{land-max}$	Área máxima para el vertedero (\$USD).
$cr_c^{agr-max}$	Máxima demanda de cultivo.
$cr_c^{agr-min}$	Mínima demanda de cultivo.
$head_1^{max}$	Altura máxima en la región.
$head_1^{min}$	Cabezas mínimas en la región.
k_F	Factor de anualización.
FC_k^{ad}	Costo fijo de la planta de digestión anaeróbica (\$USD).
FC_n^{gas}	Costo fijo de la planta de gasificación (\$USD).
FC^{gw}	Costo fijo de la planta de tratamiento de aguas residuales (\$USD).
FC_n^{land}	Costo fijo del vertedero (\$USD).
FC_r^{rec}	Costo fijo de la planta de reciclaje (\$USD).
$g_{r,m}$	Residuos sólidos municipales generados.
V_k^{ad-max}	Máxima capacidad de las plantas de digestión anaeróbica.
$V_d^{dam-max}$	Capacidad máxima de presas.
$V_d^{dam-min}$	Capacidad mínima de presas.
$V_n^{gas-max}$	Capacidad máxima de la planta de gasificación.
$V_e^{grid-max}$	Capacidad máxima de las centrales eléctricas.
V_i^{gwmax}	Capacidad máxima de las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes.
$V_j^{gwnew-max}$	Capacidad máxima de las nuevas estaciones depuradoras de aguas residuales.
$V_{r,n}^{rec-max}$	Capacidad máxima de las plantas de reciclaje.
$V^{solar-max}$	Capacidad máxima del parque solar.
VC_k^{ad}	Costo Variable de la planta de digestión anaeróbica (\$USD).
VC_n^{gas}	Costo Variable de la planta de gasificación (\$USD).
VC^{gw}	Costo Variable de la planta de tratamiento de aguas residuales (\$USD).
VC_n^{land}	Costo variable del vertedero (\$USD).
VC_r^{rec}	Costo Variable de la planta de reciclaje (\$USD).

$W_d^{\text{dam-nr}}$	Recarga natural de agua a presas (hm ³).
W_w^{domin}	Mínimo agua enviada a la planta doméstica (hm ³).
W_a^{min}	Agua mínima disponible en los acuíferos (hm ³).
W_a^{recharge}	Recarga natural de agua a los acuíferos (hm ³).
γ^{gw}	Eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales existente.
γ^{gwnew}	Eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales nueva.
$\zeta^{\text{gasification}}$	Factor de eficiencia de gasificación.
ζ_r^{rec}	Factor de eficiencia de las plantas de reciclaje.
$\lambda_r^{e-\text{gas}}$	Energía en kWh necesaria para tratar una tonelada de msw enviada a planta de gasificación.
$\lambda_r^{e-\text{land}}$	Energía en kWh necesaria para tratar una tonelada de msw enviada a vertedero.
$\lambda_r^{w-\text{gas}}$	hm ³ de agua necesaria para tratar una tonelada de msw enviada a la planta de gasificación.
$\lambda_r^{w-\text{land}}$	hm ³ de agua necesaria para tratar una tonelada de msw enviada a vertedero.
$\lambda_r^{w-\text{rec}}$	hm ³ de agua necesaria para tratar una tonelada de msw enviada a planta de reciclaje.
μ	Factor de emisión (Ton).
$\phi_c^{\text{a-agr}}$	Toneladas de cultivo por m ² .
$\phi^{\text{biogas-manure}}$	m ³ de biogás generado por Tonelada de estiércol.
$\phi^{\text{fert-manure}}$	Tonelada de biogás generada por Tonelada de estiércol.
ϕ_l^{manure}	Tonelada de estiércol generada por vaca.
$\phi_c^{w-\text{agr}}$	hm ³ de agua para cada cultivo.
$\phi_l^{w-\text{lives}}$	hm ³ de agua para ganadería.
τ_e^{biogas}	kWh de electricidad producidos por m ³ de biogás.
τ_e^{ng}	kWh de electricidad producidos por m ³ de gas natural.
ψ^{agr}	Costo venta agua para sector agropecuario (\$USD).
ψ^{biogas}	Costo de venta de biogás (\$USD).
ψ^{crop}	Costo de venta de cultivos (\$USD).
$\psi_{m,n}^{\text{distance}}$	Costo de transporte de MSW (\$USD).

ψ^{dom}	Costo venta agua para sector doméstico (\$USD).
ψ^e	Costo de venta de energía (\$USD).
ψ^{fert}	Costo de venta de fertilizantes (\$USD).
ψ^{gas}	Costo de operación de gasificación (\$USD).
ψ^{ind}	Costo venta agua para sector industrial (\$USD).
ψ^{land}	Costo de operación del vertedero (\$USD).
ψ^{meat}	costo de venta de carne (\$USD).
ψ^{ng}	Costo de operación de gas natural (\$USD).
ψ_r^{rec}	Costo de la operación de reciclaje (\$USD).
$\psi_r^{rec-sale}$	Costo de venta de papel y plástico reciclado (\$USD).
ψ^{water}	Costo de operación de agua (\$USD).

Nomenclatura del Capítulo 5

Sets

<i>a</i>	acuíferos
<i>ad</i>	Planta de digestión anaeróbica
<i>comb</i>	Planta de incineración
<i>gasi</i>	Planta de gasificación
<i>cy</i>	Central eléctrica
<i>d</i>	Presa
<i>eo</i>	Parque eólico existente
<i>f</i>	Alimentos
<i>fg</i>	Grupos de alimentos (vegetales, frutas, granos, leche, carne, leguminosas)
<i>i</i>	Plantas de tratamiento de agua existentes
<i>j</i>	Plantas de tratamiento de agua nuevas
<i>pyrc</i>	Planta de pirólisis
<i>pve</i>	Parque solar existente
<i>pvn</i>	Parque solar nuevo
<i>r</i>	Regiones
<i>s</i>	Planta de desalinización
<i>zn</i>	Planta de desalinización nueva

Acrónimos

<i>agr</i>	Agricultura
<i>Cap</i>	Capacidad
<i>CC</i>	Costo de Capital
<i>dem</i>	Demanda

<i>dom</i>	Sector Doméstico
<i>E</i>	Energía
<i>exp</i>	Exportación
<i>F</i>	Alimentos
<i>FC</i>	Costo Fijo
<i>G</i>	Residuos sólidos municipales
<i>gw</i>	Planta de tratamiento de agua gris
<i>imp</i>	Importación
<i>ind</i>	Sector Industrial
<i>lives</i>	Ganadería
<i>O</i>	Emisiones de gases de efecto invernadero
<i>OC</i>	Costo de operación
<i>OS</i>	Costo de venta
Pop_r^{Access}	Población con acceso a servicios (agua, energía o alimentos)
$Pop_r^{NAccess}$	Población sin acceso a servicios (agua, energía o alimentos)
<i>Prod</i>	Producción
<i>TOC</i>	Costo total de operación
<i>TCC</i>	Costo total de capital
<i>VC</i>	Costo variable
<i>W</i>	Agua

Publicaciones

1. Ramírez-Márquez, C., Villicaña-García, E., **Cansino-Loeza, B.**, Segovia-Hernández, J. G., & Ponce-Ortega, J. M. (2020). Inherent occupational health hazards in the production of solar grade silicon. *Process Saf. Environ. Prot.*, 142, 285-294. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.031>
2. **Cansino-Loeza, B.**, Sánchez-Zarco, X. G., Mora-Jacobo, E. G., Saggiante-Mauro, F. E., González-Bravo, R., Mahlknecht, J., & Ponce-Ortega, J. M. (2020). Systematic Approach for Assessing the Water–Energy–Food Nexus for Sustainable Development in Regions with Resource Scarcities. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 8(36), 13734-13748. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04333>
3. **Cansino-Loeza, B.**, & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Sustainable assessment of Water-Energy-Food Nexus at regional level through a multi-stakeholder optimization approach. *J. Clean. Prod.*, 290, 125194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125194>
4. **Cansino-Loeza, B.**, Tovar-Facio, J., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Stochastic optimization of the water-energy-food nexus in disadvantaged rural communities to achieve the sustainable development goals. *Sustain. Prod. Consum.*, 28, 1249-1261. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.08.005>
5. Hernández-Pérez, L. G., Villicaña-García E., **Cansino-Loeza B.**, Alsuhaibani, A. S., El-Halwagi, M. M., Ponce-Ortega J. M. (2021) Incorporating the Occupational Health in the Optimization for the Methanol Process. *J. Loss Prev. Process Ind.* 74, 104660. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104660>
6. Núñez-López, J. M., **Cansino-Loeza, B.**, Sánchez-Zarco, X. G., Ponce-Ortega, J. M. (2021). Involving Resilience in Assessment of the Water-Energy-Food Nexus for Arid and Semiarid Regions. *Clean Technol. Environ. Policy.* 1-13 <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02273-6>
7. **Cansino-Loeza, B.**, Munguía-López, A. C., Ponce-Ortega, J. M. (2022). A water-energy-food security nexus framework based on optimal resource allocation. *Environ. Sci. Policy*, 133, 1-16 <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.006>
8. Raya-Tapia, A. Y., **Cansino-Loeza, B.**, Sánchez-Zarco, X. G., Ramírez-Márquez, C., & Ponce-Ortega, J. M. (2022). A systematic approach for assessing water, energy and food security during the COVID-19 pandemic: case study of Mexico. *Environment, development and sustainability*, 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02671-2>

Referencias

- Achinas, S., Achinas, V., & Euverink, G. J. W., 2017. A technological overview of biogas production from biowaste. *Engineering*, 3(3), 299-307.
- Augutis, J.; Krikštolaitis, R.; Martišauskas, L.; Urbonienė, S.; Urbonas, R.; Ušpurienė, A. B. Analysis of Energy Security Level in the Baltic States Based on Indicator Approach. *Energy* **2020**, 199, 117427. DOI 10.1016/j.energy.2020.117427.
- Bahadorestani, A., Naderpajouh, N., Sadiq, R., **2020**. Planning for sustainable stakeholder engagement based on the assessment of conflicting interests in projects. *J. Clean. Prod.* 242, 118402. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118402>
- Bieber, N., Ker, J.H., Wang, X., Triantafyllidis, C., van Dam, K.H., Koppelaar, R.H.E.M., Shah, N., **2018**. Sustainable planning of the energy-water-food nexus using decision making tools. *Energy Policy* 113, 584–607. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.037>
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., Rosenthal, R.E., **1998**. GAMS. http://www2.imm.dtu.dk/courses/02724/general_information/GAMS_userguide/GAMSUsersGuide.pdf (accessed 5.7.20).
- Chang, N.-B., Hossain, U., Valencia, A., Qiu, J., Kapucu, N. **2020**. The Role of Food-Energy-Water Nexus Analyses in Urban Growth Models for Urban Sustainability: A Review of Synergistic Framework. *Sustainable Cities and Society*, 102486. <https://doi:10.1016/j.scs.2020.102486>
- Chanthakett, A., Arif, M. T., Khan, M. M. K., & Oo, A. M., 2021. Performance assessment of gasification reactors for sustainable management of municipal solid waste. *Journal of Environmental Management*, 291, 112661.
- Chen, S.; Chen, B. Urban Energy–Water Nexus: A Network Perspective. *Appl. Energy* **2016**, 184, 905–914. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.03.042.
- CFE. **2020**. Federal Electricity Commission. Energy Balance - Sonora. <http://www.coes.sonora.gob.mx/images/descargas/Energias-Renovables/Balance-de-energia-Sonora-2010.pdf> (accessed Aug 15, 2020).

- CONAGUA. National Water Council. Atlas of water in Mexico. **2018a**.
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/AAM2018.pdf>
 (accessed Jun 2, 2020).
- CONAGUA. National Water Council. Water Statistics in Mexico. **2018b**.
http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf (accessed Jun 2, 2020).
- CONAGUA. National Water Council. Availability by aquifers in Sonora. **2020a**.
<https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/143sonora-74834> (accessed Jul 30, 2020).
- CONAGUA. National Water Council. Agricultural Statistics of the Irrigation Units National Water Commission. **2020b**. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-unidades-de-riego> (accessed May 25, 2020).
- CONAGUA. National Water Commission **2021**. National Water Information System. Monitoring of the Main Dams in Mexico. URL: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/almacenamientoPresas.php>. (accessed 8.14.2021)
- Del Borghi, A., Moreschi, L., Gallo, M., **2020**. Circular economy approach to reduce water–energy–food nexus. *Curr. Opin. Environ. Sci. Heal.* 13, 23-28.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.10.002>
- Energysage, **2022**. Solar panel efficiency. <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/> (accessed 8.14.22)
- FAO, **2011**. Energy-smart Food for People and Climate. Issue Paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.
www.fao.org/docrep/014/i2454e/i2454e00.pdf
- FAO, **2014**. The Water-Energy-Food Nexus A new approach in support of food security and sustainable agriculture. URL <http://www.fao.org/3/a-bl496e.pdf> (accessed 5.7.20).
- FAO, **2017**. Food security and resilience. <https://www.fao.org/3/i5353e/i5353e.pdf> (accessed April, 2022)
- FAO, **2020**. Hunger and food insecurity. URL <https://www.fao.org/hunger/en/> (accessed 5.7.20).

- FAO, **2021**. The world is a critical juncture. URL <https://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/2021/en/>
- Feng, B., van Dam, K.H., Guo, M., Shah, N., Passmore, S., Wang, X., **2020**. Planning of Food-Energy-Water-Waste (FEW2) nexus for sustainable development. *BMC Chem. Eng.* 2, 4. <https://doi.org/10.1186/s42480-020-0027-3>
- Fernández, J. E.; Alcon, F.; Diaz-Espejo, A.; Hernandez-Santana, V.; Cuevas, M. V. **2020**, Water Use Indicators and Economic Analysis for On-Farm Irrigation Decision: A Case Study of a Super High Density Olive Tree Orchard. *Agric. Water Manag.* 237, 106074. DOI 10.1016/j.agwat.2020.106074.
- Garcia, D.J., Lovett, B.M., You, F., **2019**. Considering agricultural wastes and ecosystem services in Food-Energy-Water-Waste Nexus system design. *J. Clean. Prod.* 228, 941–955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.314>
- González-Bravo, R.; Nápoles-Rivera, F.; Ponce-Ortega, J. M.; El-Halwagi, M. M. **2015**, Involving Integrated Seawater Desalination-Power Plants in the Optimal Design of Water Distribution Networks. *Resour. Conserv. Recycl.* 104, 181–193. DOI 10.1016/j.resconrec.2015.08.010.
- Health Secretary, **2010**. Food guide for the Mexican population. URL. <http://fisiologia.facmed.unam.mx/wp-content/uploads/2019/02/2->
- Herrera-Pantoja, M.; Hiscock, K. M. **2015**, Projected Impacts of Climate Change on Water Availability Indicators in a Semi-Arid Region of Central Mexico. *Environ. Sci. Policy* 54, 81–89. DOI 10.1016/j.envsci.2015.06.020.
- Hooker, J. N. **2010**. Optimality conditions for distributive justice. *International Transactions in Operational Research*, 17(4), 485-505. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995-2009.00742.x>.
- Hoff, H., **2011**. Background paper for the Bonn 2011 Nexus Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. URL https://www.water-energy-food.org/uploads/media/understanding_the_nexus.pdf (accessed 3.4.20).

- Hussien, W.A., Memon, F.A., Savic, D.A., **2017**. An integrated model to evaluate water-energy-food nexus at a household scale. *Environ. Model. Softw.* 93, 366–380. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.034>
- IEA. International Energy Agency. **2021**. Access to electricity – SDG7: Data and Projections – Analysis – IEA <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections/access-to-electricity> (accessed Jul 30, 2020).
- IEA. **2022**. Levelized costs of New Generation Resources. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf (accessed 8.14.22)
- IRENA. **2015**. Ferroukhi, R., Nagpal, D., Lopez-Peña, A., Hodges, T., Mohtar, R. H., Daher, B., Keulertz, M. (2015). Renewable energy in the water, energy & food nexus. IRENA, Abu Dhabi, 1-125.
- Jensen, O.; Wu, H. Urban Water Security Indicators: Development and Pilot. *Environ. Sci. Policy* **2018**, 83, 33–45. DOI 10.1016/j.envsci.2018.02.003.
- Kaddoura, S., El Khatib, S., **2017**. Review of water-energy-food Nexus tools to improve the Nexus modelling approach for integrated policy making. *Environ. Sci. Policy* 77, 114–121. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2017.07.007>
- Kazemi, H.; Shokrgozar, M.; Kamkar, B.; Soltani, **2018**, A. Analysis of Cotton Production by Energy Indicators in Two Different Climatic Regions. *J. Clean. Prod.* 190, 729–736. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.04.195.
- Liu, G.; Yang, Z.; Fath, B. D.; Shi, L.; Ulgiati, S. **2017**, Time and Space Model of Urban Pollution Migration: Economy-Energy-Environment Nexus Network. *Appl. Energy* 186, 96–114. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.06.132.
- Liu, Y.; Wang, S.; Chen, B. **2019**; Optimization of National Food Production Layout Based on Comparative Advantage Index. *Energy Procedia*, 158, 3846–3852. DOI 10.1016/j.egypro.2019.01.862.
- Mahlknecht, J.; González-Bravo, R.; Loge, F. J. Water-Energy-Food Security: **2020**, A Nexus Perspective of the Current Situation in Latin America and the Caribbean. *Energy* 194,116824. DOI 10.1016/j.energy.2019.116824.

- Mannan, M., Al-Ansari, T., Mackey, H.R., Al-Ghamdi, S.G., **2018**. Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on life-cycle assessment. *J. Clean. Prod.* 193, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.050>
- Mercure, J.F., Paim, M.A., Bocquillon, P., Lindner, S., Salas, P., Martinelli, P., Berchin, I.I., de Andrade Guerra, J.B.S.O., Derani, C., de Albuquerque Junior, C.L., Ribeiro, J.M.P., Knobloch, F., Pollitt, H., Edwards, N.R., Holden, P.B., Foley, A., Schaphoff, S., Faraco, R.A., Vinales, J.E., **2019**. System complexity and policy integration challenges: The Brazilian Energy- Water-Food Nexus. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 105, 230-243 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.045>
- Munguía-López, A. del C., Sampat, A.M., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J.M., Zavala, V.M., **2019**. Fairness-guided design of water distribution networks for agricultural lands. *Comput. Chem. Eng.* 130, 106547. <https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2019.106547>
- Nash, J.F. Jr., **1950**. The bargaining problem. *Econometrica* 18(2):155–162 DOI: 0012-9682(195004)18:2<155:TBP>2.0.CO;2-H
- Nexus Regional Dialogue Programme, **2018**. Global Nexus Secretariat (GNS) Sector Programme Sustainable Water Policy Division Climate Change, Environment & Infrastructure (G310) Department Sector and Global Programmes.
- Nie, Y.; Avraamidou, S.; Xiao, X.; Pistikopoulos, E. N.; Li, J.; Zeng, Y.; Song, F.; Yu, J.; Zhu, M. **2018**. A Food-Energy-Water Nexus Approach for Land Use Optimization. *Sci. Total Environ.*, 659, 7–19. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.12.242.
- Ng, W. P. Q., Lam, H. L., Varbanov, P. S., & Klemeš, J. J., 2014. Waste-to-energy (WTE) network synthesis for municipal solid waste (MSW). *Energy Conversion and Management*, 85, 866-874.
- Programa Mundial de Alimentos, **2020**. Meta Data for the Food Consumption Score (FCS) Indicator | World Food Programme <https://www.wfp.org/publications/meta-data-food-consumption-score-fcs-indicator> (accessed Jun 2, 2020).
- Rawls, J., **1971**. A theory of justice. Harvard Univ. Press, Cambridge

- REN21. **2020**. Renewables 2020 Global Status Report. Secretariat, Paris, France.
- Ringler, C., Willenbockel, D., Perez, N., Rosegrant, M., Zhu, T., Matthews, N., **2016**. Global linkages among energy, food and water: an economic assessment. *J. Environ. Stud. Sci.* 6, 161–171. <https://doi.org/10.1007/s13412-016-0386-5>
- Reig, P.; Shiao, T.; Gassert, F. Aqueduct Water Risk Framework. **2020**. <http://www.wri.org/publication/aqueduct-water-> (accessed Jul 31, 2020).
- SAGARPA. **2020**. Secretary of Agriculture and Rural Development. Agricultural Production Statistics. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php> (accessed Aug 15, 2020).
- Saladini, F.; Betti, G.; Ferragina, E.; Bouraoui, F.; Cupertino, S.; Canitano, G.; Gigliotti, M.; Autino, A.; Pulselli, F. M.; Riccaboni, A.; Bidoglio, G.; Bastianoni, S. **2018**. Linking the Water-Energy-Food Nexus and Sustainable Development Indicators for the Mediterranean Region. *Ecol. Indic.*, 91, 689–697. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.04.035.
- Sampat, A.M., Zavala, V.M., **2019**. Fairness measures for decision-making and conflict resolution. *Optim. Eng.* 2019 204 20, 1249–1272. <https://doi.org/10.1007/S11081-019-09452-3>
- Schindler, F.; Michl, B.; Krenckel, P.; Riepe, S.; Benick, J.; Müller, R.; Richter, A.; Glunz, S. W.; Schubert, M. C. **2017**. Optimized Multicrystalline Silicon for Solar Cells Enabling Conversion Efficiencies of 22%. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 171, 180–186. DOI 10.1016/j.solmat.2017.06.005.
- SEMARNAT-INECC. **2016**. Secretary of Agriculture and Rural Development - National Institute of Ecology and Climate Change. *Mexico's Climate Change Mid-Century Strategy*; Mexico.
- SENER. Secretary of Energy. Energy Information System (SIE). **2019**. <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions> (accessed May 12, 2020).
- SENER. Secretary of Energy. Assessment of Energy Use. Hermosillo, Sonora, Mexico. **2013**.

- SENER. Secretary of Energy. **2016**. Rapid Assessment of Energy Use.
- SINA. National Water Information System. Monitoring of the Main Dams in Mexico. **2020**. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/almacenamientoPresas.php#popupReporte> (accessed Aug 15, 2020).
- SIAP. Agrifood and Fisheries Information Service. **2020**. Statistical Yearbook of Agricultural Production. URL: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (accessed 8.14.2021)
- Slorach, P.C., Jeswani, H.K., Cuéllar-Franca, R., Azapagic, A., **2020**. Environmental sustainability in the food-energy-water-health nexus: A new methodology and an application to food waste in a circular economy. *Waste Manag.* 113, 359–368. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.012>
- Thabrew, L., Wiek, A., Ries, R., **2009**. Environmental decision making in multi-stakeholder contexts: applicability of life cycle thinking in development planning and implementation. *J. Clean. Prod.* 17, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.03.008>
- Terrapon-Pfaff, J., Ortiz, W., Dienst, C., Gröne, M.C., **2018**. Energising the WEF nexus to enhance sustainable development at local level. *J. Environ. Manage.* 223, 409–416. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.037>
- United Nations. **2020a**. About the Sustainable Development Goals – United Nations Sustainable Development <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (accessed Jul 31, 2020).
- United Nations. **2020b**. Sustainable Development Report 2020 <https://dashboards.sdgindex.org/> (accessed Jul 31, 2020).
- U.S. Energy Information Administration (EIA). **2018**. Texas - State Energy Profile Analysis. <https://www.eia.gov/state/analysis.php?sid=TX> (accessed Aug 15, 2020).

- Vanham, D.; Leip, A.; Galli, A.; Kastner, T.; Bruckner, M.; Uwizeye, A.; van Dijk, K.; Ercin, E.; Dalin, C.; Brandão, M.; Bastianoni, S.; Fang, K.; Leach, A.; Chapagain, A.; Van der Velde, M.; Sala, S.; Pant, R.; Mancini, L.; Monforti-Ferrario, F.; Carmona-Garcia, G.; Jensen, O.; Wu, H. **2018**, Urban Water Security Indicators: Development and Pilot. *Environ. Sci. Policy*, 83, 33–45. DOI 10.1016/j.envsci.2018.02.003.
- Venghaus, S.; Dieken, **2019**S. From a Few Security Indices to the FEW Security Index: Consistency in Global Food, Energy and Water Security Assessment. *Sustain. Prod. Consum.*, 20, 342–355. DOI 10.1016/j.spc.2019.08.002.
- Wilder, M. O., Aguilar-Barajas, I., Pineda-Pablos, N., Varady, R. G., Megdal, S. B., McEvoy, J., Scott, C. A., 2016. Desalination and water security in the US–Mexico border region: assessing the social, environmental and political impacts. *Water International*, 41(5), 756-775.
- Willis, H.; Groves, D.; Ringel, J.; Mao, Z.; Efron, S.; Abbott, M. **2016**. Developing the Pardee RAND Food-Energy-Water Security Index: Toward a Global Standardized, Quantitative, and Transparent Resource Assessment | RAND <https://www.rand.org/pubs/tools/TL165.html> (accessed Jul 31, 2020).
- WHO, **2021**. Healthy diet. URL <https://www.who.int/initiatives/behealthy/healthy-diet> (accessed 5.11.20).
- World Bank. 2019. The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/476041552622967264/pdf/135312-WP-PUBLIC-14-3-2019-12-3-35-W.pdf> (accessed 8.14.22)
- Yang, Y.; Anderson, M. C.; Gao, F.; Wardlow, B.; Hain, C. R.; Otkin, J. A.; Alfieri, J.; Yang, Y.; Sun, L.; Dulaney, W. **2018**Field-Scale Mapping of Evaporative Stress Indicators of Crop Yield: An Application over Mead, NE, USA. *Remote Sens. Environ.*, 210, 387–402. DOI 10.1016/j.rse.2018.02.020.
- Yuan, M. H.; Lo, S. L. **2020**Developing Indicators for the Monitoring of the Sustainability of Food, Energy, and Water. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 119, 109565. DOI

- Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W., Fu, G., **2018**. Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies. *J. Clean. Prod.* 195, 625-639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.194>
- Zhang, X., Vesselinov, V. V., **2017**. Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. *Adv. Water Resour.* 101, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.12.017>
- Zucchinelli, M., Spinelli, R., Corrado, S., Lamastra, L., **2021**. Evaluation of the influence on water consumption and water scarcity of different healthy diet scenarios. *J. Environ. Manag.* 291, 112687.