

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



# **Análisis del Nexo Agua-Energía-Alimentos en Baja California**

Tesis para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias

Presenta:

Claudia Lizeth Pérez León

Director:

Dr. Alexis Acuña Ramírez

Mexicali, Baja California, junio de 2024

# ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
ACRÓNIMOS Y SIGLAS.....	7
CAPÍTULO I.....	8
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	8
1.1. Planteamiento del problema .....	8
1.1.1. Acceso a la energía .....	9
1.1.2. Acceso al agua .....	12
1.1.3. Acceso a los alimentos .....	15
1.1.4. Principales retos en el nexo agua-energía-alimentos.....	18
1.1.5. México y el cambio climático .....	18
1.2.6. Baja California ante el cambio climático.....	20
1.2. Objetivos de la investigación .....	23
1.2.1. Objetivo General .....	23
1.2.2. Objetivos específicos .....	23
1.3. Justificación y uso de resultados .....	23
1.3.1. Antecedentes .....	25
1.4. Hipótesis.....	38
CAPÍTULO II.....	39
2. Marco teórico.....	39
2.1. Nexo agua-energía-alimentos.....	39
2.2. Simulación .....	41
2.3. Optimización.....	41
2.4. Optimización multiobjetivo .....	42
2.5. Desarrollo sustentable .....	42
2.6. Energías renovables .....	43
2.7. Programación matemática .....	43
2.8. Flujo entre agua-energía-alimentos .....	44
2.9. Índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos .....	44
CAPÍTULO III .....	46
3. METODOLOGÍA .....	46
3.1. Caso de estudio: Baja California.....	48
3.1.1. Criterios de exclusión.....	48
3.1.2. Descripción General y Análisis Climatológico del área de estudio.....	49
3.1.3. Flujos entre agua-energía-alimentos del problema planteado .....	50
3.1.4. Nomenclatura .....	52

3.2. Metodología del índice de seguridad del nexo agua-energía-alimentos .....	52
3.2.1. Modelo matemático.....	57
3.2.4. Enfoque de resolución multiobjetivo .....	63
CAPÍTULO IV .....	65
4. RESULTADOS.....	65
4.1. Resultados de los índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos .....	65
4.2. Enfoque multiobjetivo en los índices de seguridad .....	70
4.3. Resultados del modelo matemático de optimización .....	76
4.4. Propuestas de la optimización de índices de seguridad del nexo agua-energía- alimentos .....	76
CAPÍTULO V .....	78
5. CONCLUSIONES .....	78
REFERENCIAS .....	81

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nomenclaturas .....	52
Tabla 2. Parámetros referentes a los alimentos (FAO, 2022).....	55
Tabla 3. Valores ambientales para los escenarios del caso de estudio (2022) en mil toneladas al año. ....	67
Tabla 4. Valores económicos para los escenarios del caso de estudio (2022) en millones de dólares al año. ....	67
Tabla 5. Generación energética para los escenarios del caso de estudio (2022) en GWh al año. ....	68

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Representación esquemática de los índices de seguridad hídricos, energéticos y alimentarios en Baja California, México para el año 2022. ....	66
Fig. 2 Representación esquemática del enfoque multiobjetivo en los índices de seguridad hídricos, energéticos y alimentarios en Baja California, México (2022). ....	71
Fig. 3 Representación esquemática del escenario 'C' en los índices de seguridad hídricos, energéticos y alimentarios (2022). ....	74

## RESUMEN

El estado de Baja California enfrenta desafíos significativos en la gestión sostenible de sus recursos hídricos, energéticos y alimentarios, desafíos que se ven agravados por los efectos del cambio climático. La implementación del enfoque nexo agua-energía-alimentos se presenta como una solución integral para abordar estos problemas interrelacionados, promoviendo la seguridad y sostenibilidad en cada uno de estos sectores críticos. En este contexto, se propone un modelo de análisis numérico que incorpora aspectos tanto cuantitativos como cualitativos relacionados con el cambio climático y el bienestar social, optimizando las propuestas e implementación de estrategias en Baja California, una región especialmente vulnerable ante los efectos del cambio climático. Los modelos de optimización permiten analizar datos de áreas de interés y proyectar soluciones específicas para problemas complejos, especialmente cuando los objetivos deseados no pueden alcanzarse simultáneamente. Incorporando funciones objetivo que impacten en los aspectos social, económico y ambiental, este trabajo propone evaluar la seguridad hídrica, energética y alimentaria para satisfacer plenamente las demandas de la población. Además, se analizan múltiples escenarios utilizando el enfoque multiobjetivo, basado en la mitigación del cambio climático, la minimización de costos tecnológicos y el bienestar social, mediante un estudio multidisciplinario que asegura la fiabilidad y sustentabilidad en la gestión de los recursos. El Área de Estudio de Baja California (AEBC) se selecciona como caso de estudio. Esta región semiárida, ubicada en el noroeste de México, enfrenta un crecimiento acelerado de la población y la economía, lo cual genera un estrés significativo sobre sus recursos naturales. La implementación del enfoque nexo no solo busca optimizar el uso de los recursos, sino también reducir el riesgo de conflictos sociales relacionados con el acceso y uso de estos recursos, orientando la toma de decisiones hacia una optimización que considere múltiples partes interesadas. Este enfoque es esencial para garantizar un desarrollo sostenible y equitativo, que beneficie a las generaciones presentes y futuras.

**Palabras clave:** Nexo agua-energía-alimentos, Desarrollo Sustentable, Cambio Climático, Optimización lineal multiobjetivo.

## ACRÓNIMOS Y SIGLAS

GEI: Gases de Efecto Invernadero

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

SAGARPA: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

CONEVAL: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social

INEGYCEI: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

SIAP: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. Planteamiento del problema

En la sociedad hiperconectada que vivimos hoy en día, el agua, la energía y los alimentos son recursos naturales indispensables en la comunidad y el interés por ellos radica en que se encuentran cada vez más interrelacionados entre sí, es decir, conforme pasa el tiempo más se contemplan mayores interdependencias entre los sectores. La interrelación entre estos tres recursos (agua, energía y alimentos) se encuentra de múltiples maneras y es extensa en Baja California, por ejemplo:

- A nivel estatal, CONAGUA (2018) indica que el sector agrícola consume el 77.04% del total de volumen concesionado para usos agrupados consuntivos en la entidad federativa, es decir, el agua utilizada para riego de cultivos. El 15.08% pertenece al abastecimiento público a través de redes de agua potable (domicilios, industrias y a quienes estén conectados dichas redes). Un pequeño porcentaje del 2.4% se dirige hacia la industria autoabastecida a través de aquellas empresas que toman el agua directamente de los ríos, arroyos, lagos y acuíferos del país. Y, por último, el 5.47% pertenece a la energía eléctrica (excluyendo hidroelectricidad) donde el agua se utiliza para producir electricidad en termoeléctricas.
- En Baja California, existen 42 plantas potabilizadoras en operación de capacidad instalada de 12,637.1 l/s con un caudal potabilizado de 8,563.41 l/s, uno de los mayores caudales del país (CONAGUA, 2021). Para obtener y transportar el agua hasta las plantas de potabilización, se requiere de energía en diferente medida dependiendo de la fuente de la que se la extraiga: aguas superficiales, aguas subterráneas, agua salada (que requiere un proceso extra de desalinización) o agua reciclada. De acuerdo con la Asociación Internacional de Hidroelectricidad (IHA, por sus siglas en inglés), producir 1 m<sup>3</sup> de agua potable exige entre 0.37 y 8.5 kWh, dependiendo de su fuente.
- La relación agua-energía-alimentos también es observada en el volumen declarado para el pago de derechos por extracción, uso o aprovechamiento de aguas nacionales en Baja California. De un total de agua de 389.7 hm<sup>3</sup>, el 23.42% es dirigido a hidroeléctricas y el 0.33% al sector agropecuario. El resto

es distribuido entre el régimen general, público urbano, acuacultura y, balnearios y centros recreativos.

Debido al desarrollo tecnológico en el Estado, la interrelación puede incrementar aún más debido al uso de nuevas estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático; la optimización de riego puede ahorrar agua pero es capaz de incrementar el consumo de energía y llega a amenazar la sustentabilidad de acuíferos, la producción de biocombustibles puede disminuir la dependencia del petróleo pero afecta y rebaja la producción de alimentos, los subsidios a precios de energía llegan a incrementar la producción agrícola pero a la larga llevan a los países a consumir demasiada energía, por mencionar algunos ejemplos.

Algunas proyecciones indican que la demanda de agua, energía, y alimentos va a incrementar de forma significativa en las próximas décadas debido la relación que mantiene con la creciente presión económica, social y ambiental a razón del crecimiento de la población, el desarrollo económico, la urbanización, y los efectos derivados del cambio climático, que ponen de relieve las diversas interdependencias y conflictos entre estos sectores. Baja California ha empezado a sufrir estrés relacionado con al menos uno de estos sectores y se estima que las presiones sobre los mismos se intensificarán a mayor escala en los próximos años.

Siguiendo los enfoques recomendados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y los lineamientos aplicados en las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en 2015 la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable estimó que las emisiones brutas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en Baja California continúen incrementando constantemente año con año encontrando los aumentos más significativos para el periodo de 1990-2005 en los sectores de transporte y suministro de electricidad, mientras que los niveles más bajos de GEI se han encontrado en el sector agrícola, la silvicultura y uso de suelo. Debido a las emisiones de GEI, específicamente emisiones de dióxido de carbono, se agudizan los problemas colaterales que afectan la salud de las y los bajacalifornianos, por ello es necesario cuantificar estas emisiones como medida de adaptación y mitigación a los efectos del cambio climático.

#### 1.1.1. Acceso a la energía

Tomando como referencia al sector energético; se cuenta con un total de 3,769,020 habitantes en Baja California en el año 2020 (INEGI, 2020) y en 2030 se

proyecta un volumen de 4,138,349 personas con una tasa de crecimiento de 1.08 por ciento anual; en 2050 llegará a 4,776,728 habitantes a un ritmo de crecimiento menor (CONAPO, 2016). Según las tipologías propuestas por la FAO se clasifica a Baja California como “Sitio emergente, experimentando un fuerte crecimiento de población” ya que el 61% de la población activa trabaja en los sectores de comercio y servicios, además de tener un crecimiento anual de 1.08%.

Esta situación ocasiona, entre otras cosas, una mayor demanda de servicios, como el transporte de personas y mercancías, el uso de más energía eléctrica que requiere del incremento en el consumo de combustibles como las gasolinas, diésel y gas L.P. y natural, cuya quema ocasiona una mayor emisión de gases contaminantes a la atmósfera.

De acuerdo con el Pronóstico Regional 2019-2033 (CENACE, 2019), se estima un aumento del consumo bruto energético en Baja California a una tasa media de crecimiento anual de 2.91% pasando de 16,293 GWh en 2022 a 22,217 GWh en 2033. A pesar del aumento del consumo bruto energético estimado, en 2022 se proyectó un déficit de energía eléctrica de 600 MW en el Estado. Esto genera un problema de abastecimiento de energía eléctrica, siendo crítico para el sector industrial desde hace años. Sin embargo, también se ha empezado a notar en la ciudadanía en general, reflejado en apagones y el llamado “protocolo correctivo”, que es el nombre técnico asignado a una licitación para los meses de junio al último día de septiembre.

#### 1.1.1.1. Conformación actual del sistema eléctrico

La operación de Baja California está bajo la responsabilidad del Centro de Control Regional ubicado en la ciudad de Mexicali. El Sistema Interconectado Baja California (SIBC) opera interconectado a la Red Eléctrica de la región Oeste de EE UU. Western Electricity Coordinating Council (WECC) por medio de dos líneas de transmisión conectadas a un nivel de tensión de 230 kV en corriente alterna (SENER, 2022). De acuerdo con el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), una de estas centrales privadas es la que ha presentado fallas repentinas que, sumado a la fragilidad del sistema, han ocasionado apagones.

#### 1.1.1.2. Capacidad geotérmica instalada en el Estado

En el año 2020, México ocupaba el sexto lugar mundial en capacidad geotermoeléctrica instalada con 963 MWe. Al cierre del año 2021, la capacidad

instalada en Baja California es de 570 MW, a través de la explotación del campo geotérmico (SENER, 2022).

#### 1.1.1.3. Enlaces internacionales

En Baja California se tienen dos Centrales de Ciclo Combinado (CCC) y una Central Eléctrica Eólica (EO) que operan con permiso como Exportador, están ubicadas en territorio nacional, y conectadas directamente a la WECC. Entre el SIBC y el WECC se tienen dos enlaces síncronos operando en 230 Kv (SENER, 2022).

#### 1.1.1.4. Consumo neto de energía eléctrica

El Sistema Interconectado de Baja California (SIBC) indica un consumo neto de energía eléctrica de 14,130 GWh en decrecimiento del 0.9% para el año 2019. Al año siguiente aumenta un 3.9% con 14,683 GWh y posteriormente para el año 2021 hubo un incremento del 5.8% con 15,541 GWh. El consumo per cápita en Baja California en el año 2021 se estimó en 4,087 KWh/hab., siendo el cuarto sistema de generación de energía más alto en nivel de consumo por habitante del país (SENER con información de CENACE, 2022).

#### 1.1.1.5. Pronóstico regional del consumo neto 2022-2036

De acuerdo con el escenario de planeación energética 2022-2036, Baja California pasará de generar 16,316 GWh (año 2022) a tener un consumo de 24,597 GWh para el año 2036, reflejando un aumento de consumo neto de energía anual de 3.38% aproximadamente (SENER con información de CENACE, 2022).

#### 1.1.1.6. Pronóstico regional de pérdidas de energía eléctrica 2022-2036

Fundamentalmente, las pérdidas técnicas se conocen como la energía térmica que se desprende del paso de la electricidad a través de las líneas de transmisión y distribución, mientras que las pérdidas no técnicas son aquellas cuando la energía se toma del sistema sin que el medidor de energía registre el consumo. En Baja California se estima que tales pérdidas sean de 876 GWh, en 2022, a 1 320 GWh para el año 2036 (SENER con información de CENACE, 2022).

#### 1.1.1.7. Visión general del sector energético en el país

En México, las emisiones de Energía en 2019 alcanzaron 467,892.37 Gg CO<sub>2</sub>e, cantidad que representó 63.52% de las emisiones totales del INEGYCEI (con UTCUTS). Incluyen las derivadas del consumo energético de combustibles fósiles y de emisiones fugitivas, y no incluyen las emisiones del transporte y almacenamiento de

CO<sub>2</sub>. Si bien el volumen de emisiones fue 6% menor que el de 2018, es 54% mayor que las emisiones de 1990. El consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica y para el transporte han marcado el comportamiento histórico (SEMARNAT e INECC, 2022).

De acuerdo con la conformación actual del sistema eléctrico, y el incremento del consumo neto y pérdidas de energía, se puede concluir que en Baja California pueden existir problemáticas energéticas cada vez más frecuentes.

Por lo que es necesario establecer objetivos, metas y prioridades adoptables para satisfacer la demanda energética y contabilizar las emisiones de GEI para la generación de energía eléctrica, ya sea la refinación, fabricación de combustibles sólidos y para todas aquellas actividades que demandan combustibles fósiles dentro de las cadenas de producción de petróleo y gas natural, procurando las necesidades de las y los bajacalifornianos.

#### 1.1.2. Acceso al agua

Por municipios, Tijuana es el más poblado con 1 922 523 habitantes (INEGI, 2020), lo que significa que Tijuana es más vulnerable a la problemática del recurso hídrico. En segunda medida, la ciudad tiene una limitada disponibilidad natural de las fuentes de agua debido a los escasos recursos hídricos propios, tanto fuentes superficiales como subterráneas.

La Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) entre México y Estados Unidos dio a conocer que en 2022 Baja California tendrá un recorte de 99 millones de m<sup>3</sup> del agua que normalmente recibe; 62 millones de metros cúbicos de agua proveniente del Río Colorado serán recortados y, adicionalmente, México deberá contribuir con el ahorro de 37 millones de m<sup>3</sup>. En este sentido, se señala que la cantidad de agua que será recortada en el año equivale al consumo anual de la ciudad de Mexicali o lo necesario para regar 10 mil hectáreas de uso agrícola en el valle de Mexicali (Cortez, 2022). Se enfatiza en que este recorte no implicaría una afectación directa en el consumo diario de agua de las personas; sino que será en el campo agrícola donde impactará y por lo tanto en donde se tendrán que tomar las medidas necesarias para enfrentar este recorte. Además, en Baja California se tiene una proyección de demanda de agua potable notablemente en crecimiento desde 8,410 l/s en 2016 a 9,387 l/s en 2035 (INEGI-CONAPO, 2016). Por ello, es necesario un mejor aprovechamiento del uso del agua en el Estado.

### 1.1.2.1. Hidrología del Estado de Baja California

Debido a su localización geográfica, baja precipitación pluvial y a su limitada presencia de lagos, ríos, arroyos y manantiales, Baja California cuenta generalmente con una baja disponibilidad de agua. Por lo mismo, su desarrollo se ha impulsado con caudales que proceden de los compromisos establecidos en el Tratado de Distribución de Aguas de 1944 entre México y los EE. UU. El 88% del total de los recursos hidrológicos del Estado se localizan en el Valle de Mexicali, de los cuales el Río Colorado aporta el 57%. El 12% restante proviene de los recursos acuíferos subterráneos dispersos en el Estado y de los almacenamientos existentes en las presas.

Como solución al abastecimiento de la demanda en el resto del Estado se construyó el acueducto Rio Colorado-Tijuana, donde en el año 2021 se condujeron 166,509,443 millones de metros cúbicos, representando un caudal promedio de 5,280 l/s y los consumos de Tijuana y Tecate fueron de 5,165 l/s, a su vez su demanda se complementó con fuentes locales. Para conducir esos volúmenes se consumieron 3.91 KWh/m<sup>3</sup> a un costo promedio de \$8.60 por m<sup>3</sup> (SEPROA, 2022).

El monitoreo de los principales cuerpos de agua del país lo lleva a cabo la CONAGUA a través de la Red Nacional de medición de Calidad del Agua, donde la información de Baja California se encuentra integrada en un solo archivo y clasificada por tipo de cuerpo de agua. La red del Estado se constituye por cuerpos de agua lóticos, lénticos, costeros y subterráneos.

Los principales cuerpos de agua lénticos de subtipo "Presa" son la Presa Abelardo L. Rodríguez, Presa El Carrizo, Presa Emilio López Zamora, Presa Derivadora Morelos (donde se derivan las aguas del Río Colorado hacia la red de canales en el Distrito de Riego 014) y la Presa Las Auras, a su vez se toma como cuerpo de agua la Laguna Salada.

En la entidad se localizan cinco presas de almacenamiento de agua: Abelardo L. Rodríguez, El Carrizo, Emilio López Zamora, la Derivadora Morelos y Las Auras (SEPROA, 2022).

### 1.1.2.2. Sobreexplotación de acuíferos

Se entiende que la sobreexplotación es un proceso que termina por restringir o limitar la oferta de agua de las fuentes agotadas. Mientras esta situación se mantenga,

todos los sectores usuarios se verán cada día más amenazados por la escasez, más aún durante temporadas de sequías y ante efectos del calentamiento global.

Al 17 de septiembre de 2020 se reportaron 17 acuíferos sobreexplotados en la Península de Baja California del total de 88 acuíferos en la región. De acuerdo con los resultados de estudios más recientes, se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo en función de la relación extracción/recarga. En el Estado se tiene una Recarga media de  $1\,648\text{ hm}^3$ , siendo la menor recarga en el país (CONAGUA, 2021).

#### 1.1.2.3. Grado de presión sobre el recurso hídrico

El porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto al agua renovable es el indicador de grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico. El grado de presión puede ser muy alto, alto, medio, bajo y sin estrés. En 2020, Baja California tiene un volumen total de agua concesionado de  $4\,462\text{ hm}^3/\text{año}$  y el volumen de agua renovable es de  $4\,960\text{ hm}^3/\text{año}$ , por lo que el Grado de presión del Estado es de 90%, considerado alto y mantiene el segundo lugar de clasificación más alta de Grado de presión del país (CONAGUA, 2021).

#### 1.1.2.4. Escenarios futuros

Tomando en cuenta la información de disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, los volúmenes concesionados para los diferentes usos consuntivos, las proyecciones de población y de acuerdo con la tendencia histórica observada, se ha proyectado que el volumen concesionado per cápita se estima en  $935\text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$  para el año 2030, disminuyendo un 0.1% la extracción de agua destinada al abastecimiento público (por habitante) a comparación del 2020. El porcentaje de Grado de presión se ejercería del 90% en 2020 a 103.9% en 2030. Finalmente, el valor calculado para agua renovable per cápita será de  $900\text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$  para el 2030, teniendo un decrecimiento del 13.54% a comparación del 2020 ( $1\,041\text{ m}^3/\text{hab}/\text{año}$ ) (CONAGUA, 2021), las regiones en donde este valor es menor a  $1\,700\text{ m}^3/\text{año}$  se considera que presentan "estrés hídrico" y cuando es inferior a  $1\,000\text{ m}^3/\text{año}$ , que es lo que indica la proyección a 2030, se considera que las consecuencias pueden ser más severas y comprometen seriamente la producción de alimentos, el desarrollo económico del país y la protección de sus ecosistemas (SEMARNAT, 2002).

#### 1.1.2.5. Situación hídrica

A razón de este desglose de datos, donde convergen condiciones de poca precipitación pluvial, y existen altos índices de sobreexplotación de acuíferos y de grados de presión. El acceso al agua es una problemática a la que se están enfrentando las y los bajacalifornianos en la actualidad. Actualmente nuestro Estado vive un momento muy importante en este tema, que nos motiva a diversificar nuestras opciones de fuentes de abastecimiento, buscando garantizar la disponibilidad de agua para la demanda actual y futura de todos los municipios del Estado.

#### 1.1.3. Acceso a los alimentos

En el año 2007 se cosecharon en Baja California un promedio anual de 215 mil hectáreas, lo que representó el 1.1% de la superficie cosechada a nivel nacional (SAGARPA, 2008). Sin embargo, en 2021 los municipios con mayor superficie sembrada son: Mexicali con 147 mil 777 ha., Ensenada con 30 mil 300 ha. y Tecate con 875 ha (SADE, 2021), con lo que se puede observar el decrecimiento del área cosechada en el estado. Del año 2016 a 2019 se redujo 9.78% la cantidad de hectáreas sembradas en el Valle de Mexicali, y desde 2015 se redujo un 0.1% el aporte al PIB primario nacional, reflejo que existe un estancamiento en el aporte de Baja California (SHBC, 2019). Por ello, se demandan estrategias que impulsen la productividad para beneficiar el producto del campo puesto que la baja productividad se puede ver reflejada en productos de menor calidad y materia prima proveniente del campo a precio más alto, por el mayor costo de producción.

##### 1.1.3.1. Zonas de producción

En el estado de Baja California existen tres regiones agrícolas: el valle de Mexicali, la región de la costa del Pacífico integrada por San Quintín, San Vicente, Camalú, Maneadero, y por último la Zona Central (Intermontaña), conformada por el valle de Guadalupe, el Valle de la Trinidad, Ojos Negros y las zonas productoras del desierto.

##### 1.1.3.2. Producción agroalimentaria de Baja California

De acuerdo con la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2022), en la actividad agrícola los principales productos en el Estado fueron: alfalfa (2,995,749 ton.), algodón hueso (62,311 ton.), arándano (4,814 ton.), avena grano (2,922 ton.), brócoli (14,268 ton.), cebolla (100,197 ton.), coliflor (2,941 ton.), esparrago (30,495 ton.), frambuesa (16,089 ton.), fresa (91,628 ton.), lechuga (31,703 ton.), nopalitos (12,974

ton.), pepino (47,299 ton.), sorgo forrajero (148,120 ton.), trigo grano (313,529 ton.), uva fruta (5,367 ton.), uva industrial (24,748 ton.), uva pasa (342 ton.), y zarzamora (873 ton.),

En el subsector pecuario, el principal producto reconocido en Baja California por su producción es la carne en canal de bovino (111,882 ton.). Finalmente, en el subsector pesquero, los principales productos en el Estado fueron: atún (8,650 ton.), camarón (1,764 ton.), langosta (586 ton.), pulpo (204 ton.) y sardina (123,698 ton.)

#### 1.1.3.3. Carencia por acceso a la alimentación en Baja California

En el año 2018, según datos del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), el 23.6% de la población de Baja California se encontraba en situación de pobreza, significando que tenían al menos una carencia social y no presentaban un ingreso apto para satisfacer sus necesidades básicas. Específicamente respecto a la alimentación, el CONEVAL indica que se considera que una persona tiene carencia por acceso a la alimentación nutritiva y de calidad si en su hogar se presenta: 1) inseguridad alimentaria moderada o severa; o, 2) limitación en el consumo de alimentos, es decir, las personas tuvieron una dieta limítrofe. En ese mismo año, el 14.1% de la población tuvo un limitado acceso a una alimentación con características nutritivas y de calidad (CONEVAL, 2018); ocupando el lugar 28 a nivel nacional por sus niveles de carencia nutricional.

Para el análisis del año 2022 el porcentaje de población en situación de pobreza en el Estado fue de 13.4% y pobreza extrema en un 1.3%; Esta información ofrece un primer panorama sobre la evolución de la pobreza ante, por un lado, la recuperación del ingreso de las personas después de la pandemia por el virus SARS-CoV-2 (COVID-19), y con ello un mayor acceso a la alimentación; y por otro lado, los retos que presenta la persistencia de población en situación de pobreza y pobreza extrema, representando una proporción de la población sin acceso a tener una alimentación suficiente. Para combatir esta condición, se deben establecer acciones específicas que faciliten el acceso tanto físico como económico a alimentos suficientes, nutritivos y de calidad.

#### 1.1.3.4. Relación agua-alimentos

El sector agrícola consume el 77.04% del total de volumen concesionado para usos agrupados consuntivos en la entidad federativa. Tales usos disminuyen el volumen de agua disponible y es utilizada para riego de cultivos, principalmente de origen superficial.

El uso del agua para fines agrícolas es un tema que genera discusión sobre los recursos hídricos y la seguridad alimentaria, por lo que el enfoque nexo agua-alimentos ayuda a determinar las necesidades prioritarias de una región y posteriormente, tomar decisiones pertinentes al respecto. En promedio, en la agricultura se ocupa el 70% del agua que se extrae en el mundo, y las actividades agrícolas representan una proporción aún mayor del "uso consuntivo del agua" debido a la evapotranspiración de los cultivos (Banco Mundial, 2017). Se puede concluir entonces, que el sector alimenticio depende en gran medida del agua, por lo que promover instalaciones de riego, tecnologías eficientes, cultura de regadío, entre otras estrategias, es necesario para desarrollar una sociedad.

Una de las interrelaciones que han sido motivo de estudio en el nexo agua-alimentos son las consecuencias de la crisis hídrica en una región. Situación que puede que genere reasignaciones provenientes de la agricultura debido a su elevada participación en el consumo de agua. Los desplazamientos tendrán que ser tanto físicos como virtuales. Los desplazamientos físicos pueden traducirse en cambios en las asignaciones iniciales de recursos de aguas superficiales y subterráneas, así como en el traspaso de las "ventas" del agua, principalmente de los usuarios agrícolas a los usuarios urbanos, ambientales e industriales. El agua también puede desplazarse virtualmente a medida que la producción de alimentos con alto consumo de agua se concentre en lugares con abundancia de recursos hídricos y los productos se vendan en sitios con escasez de agua (Banco Mundial, 2017).

#### 1.1.3.5. Condiciones socioeconómicas a partir de alimentos

La agricultura logra una participación importante en el desarrollo económico de los países, más aún en los países menos desarrollados porque la mayoría de su población depende de ella para su subsistencia. En México, el sector agropecuario representa el 10% del PIB ya que la agricultura es la actividad económica que genera mayor valor, con un 70% del total del sector primario (SAGARPA, 2018). Debido a la fuerte presión de la población en Baja California, la demanda de alimentos está creciendo a un ritmo acelerado. Si la agricultura no satisface la demanda de productos alimenticios, afectaría negativamente la tasa de crecimiento de la economía. Por lo tanto, el aumento de la oferta por parte del sector Alimentos tiene una gran importancia para el desarrollo económico del país.

Durante el año agrícola 2017-2018 en la península de Baja California, hubo una superficie total de 245 693 hectáreas con un valor de cosecha de 11 978 MDP, permitiendo una productividad económica de 4.12 \$/m<sup>3</sup>. Destacando así, la relevancia del sector agrícola en la economía del Estado. Además, este alcance económico fue determinado con una superficie física regada de 199 677 hectáreas, por lo que promover acciones de gestión de recursos hídricos no únicamente mejoraría la seguridad alimentaria del Estado, sino que haría progresar la economía en Baja California.

#### 1.1.4. Principales retos en el nexo agua-energía-alimentos

Dar respuesta a los desafíos en la región requiere la elaboración de políticas y marcos normativos que tengan en cuenta las interrelaciones entre agua, energía y alimentación. Los retos en este sentido son múltiples, debido a falta de información, capacidades limitadas, débil gobernabilidad, ineficacia normativa, alta informalidad, inestabilidad política y las desfavorables condiciones macroeconómicas de la región (Embid y Martín, 2018). También es indicado en el Plan Estatal de Desarrollo de Baja California 2022-2027 que la biodiversidad y ecosistemas del Estado se aprovechan de manera irresponsable y no se regulan de acuerdo a la legislación vigente. Existe una carencia de políticas públicas y estrategias efectivas que impulsen el fortalecimiento de las medidas orientadas al uso sustentable de los recursos. De igual manera, existe poca cultura ambiental en la población que la concientice en la protección y conservación del medio ambiente y sus recursos naturales. Mantener el equilibrio del medio ambiente en Baja California puede ser considerado extenso, por lo que en el presente proyecto el diseño de herramientas de medición del uso de recursos naturales es una estrategia propuesta para tomar medidas correctivas y/o preventivas a favor de la salud y bienestar de las y los bajacalifornianos.

#### 1.1.5. México y el cambio climático

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) indica que los eventos hidrometeorológicos extremos aumentan cada año a consecuencia del cambio climático y es relacionado con daños económicos, que han pasado de un promedio anual de 730 millones de pesos en el periodo de 1980 a 1999 a 21,950 millones para el periodo 2000-2012. El incremento, además de estar asociado a la mayor ocurrencia de eventos, obedece a un aumento en la exposición, por ejemplo, la creciente urbanización (Gobierno de la República, 2013). Por otro lado, en el periodo de 2005-2011, el

presupuesto federal asignado al Fondo Nacional de Desastres (FONDEN) fue 37 veces mayor al presupuesto del Fondo de Prevención de Desastres (FOPREDEN) (Gobierno de la República, 2014); por lo que se ha presentado una tendencia creciente a la atención a comparación de la prevención de desastres, indicando así una fuerte inclinación hacia la mitigación de impactos ante el cambio climático una vez que ocurren y una débil postura ante la preparación y/o adaptación ante los mismos efectos, creando la necesidad de acciones resilientes que minimicen los riesgos y el impacto económico provocado por el cambio climático.

En México, las emisiones de GEI ascendieron a 736.6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (MtCO<sub>2</sub>e) en 2019 (sin considerar las absorciones), de las cuales la mayor aportación se debe a las actividades de generación de energía eléctrica con 23.3%, seguida por el autotransporte con 18.5% y ganadería de bovinos con 13.2% (SEMARNAT e INECC, 2022). En 2019 se observó una absorción de 201.94 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por actividades de reforestación y permanencia de tierras donde el carbono fue absorbido del CO<sub>2</sub> atmosférico, permitiendo emisiones netas (emisiones menos las absorciones) de 534.69 MtCO<sub>2</sub>e.

En definitiva, las emisiones de GEI sin absorciones en México entre 1990 (467 MtCO<sub>2</sub>e) y 2019 (737 MtCO<sub>2</sub>e) reflejaron un comportamiento creciente que incrementó un 57.8% a una tasa de crecimiento media anual (TCMA) de 1.59%. Entre 2010 y 2019 el crecimiento fue más moderado, con un aumento total de 2.57% (TCMA = 0.28%) en emisiones. El incremento de emisiones en la serie histórica está relacionado principalmente con el crecimiento de la economía en el país y de la población, la tendencia histórica del PIB y de la población en México ha sido de un crecimiento constante. En 2019, el PIB fue más del doble que el de 1990. Durante ese mismo periodo, la población se incrementó en 56% (SEMARNAT e INECC, 2022). Ambos indicadores suelen ser asociados al incremento de las emisiones de GEI, aunque tal incremento se ha dado de manera menos acelerada en ese mismo periodo, las emisiones continúan aumentando.

El principal gas de efecto invernadero del país es el dióxido de carbono con 67%, seguido por el metano con 24%, y el óxido nitroso con 6%; el resto corresponde a gases "F" (HFC, PFC, NF<sub>3</sub>, SF<sub>6</sub>). Las emisiones de carbono negro fueron contabilizadas en 65,582 toneladas en 2019, la importancia de este contaminante radica en que es un

forzador climático de vida corta (FCVC) que tiene efectos adversos en la salud y en los ecosistemas.

El Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) indicó que el GEI más importante en el país es el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Si bien, tal contaminante ha presentado una disminución de 7.56% con respecto a 1990, tiene un pico máximo en 2016 y un crecimiento más desacelerado durante los últimos años. Esta tendencia al alza obedece mayormente el uso de combustibles fósiles principalmente para la generación de energía eléctrica y al uso de vehículos de autotransporte. A su vez, las emisiones de hidrofluorocarbonos (HFC) presentaron en 2019 un crecimiento de 2757% con respecto a 1990 debido principalmente al aumento del uso de sistemas de refrigeración y aires acondicionados, directamente relacionado al sector Energía.

El sector de Agricultura presenta un comportamiento más homogéneo a lo largo de la serie histórica. Las actividades que más contribuyen al cambio climático y a la generación de GEI en este sector son la fermentación entérica y el manejo de excretas del ganado, acciones que generan principalmente emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ). Por otro lado, el tratamiento y eliminación de aguas residuales también son fuentes generadoras de  $\text{CH}_4$ , actividad relacionada al sector Agua. Sus emisiones han tenido una tendencia creciente (48.4 % con respecto a 1990), aunque ha sido menos pronunciada que la tendencia del  $\text{CO}_2$ .

Las emisiones de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) de manera general se deben al uso de fertilizantes, al manejo de excretas y al tratamiento y eliminación de aguas residuales, actividades relacionadas con el sector Agricultura y Agua. Al igual que el metano, este gas ha tenido un crecimiento moderado (45.35% de incremento con respecto a 1990), pero menor que el del  $\text{CO}_2$ .

#### 1.2.6. Baja California ante el cambio climático

Baja California ha continuado en ser una región de gran importancia para el país, mayormente de acuerdo con la relación socioeconómica entre México y Estados Unidos de América, entre quienes existe una relación energética, económica y social (respecto a migración), y ha sido puerta de entrada hacia el Océano Pacífico. Es importante destacar su importancia económica ya que puede verse reflejada en emisiones industriales elevadas, que sumándose con el crecimiento poblacional de las últimas décadas lleva a plantear escenarios de vulnerabilidad en el Estado.

La economía del Estado contribuye con el 2.8% del producto interno bruto del país (PIB) (INEGI, 2014). Es centrada en actividades terciarias, esto es, el comercio y servicios, los cuales representan el 61% del movimiento comercial; seguido por las actividades secundarias con el 35.61% donde destacan la minería, la construcción, agua y gas, y la industria manufacturera; y, en menor medida las actividades primarias con el 3.2% en participación de la agricultura, la ganadería, el aprovechamiento forestal, la pesca y caza. Baja California también ha destacado por haber sido el primer lugar nacional en la producción de cebolla, frambuesa y flores, segundo lugar nacional en la producción de tomate rojo, fresa, algodón, zacate de semilla y dátil, y tercer lugar nacional en la producción de uva y espárrago (INEGI, 2015).

La contaminación de la atmósfera es uno de los temas ambientales más relevantes en las últimas décadas debido a sus efectos negativos por el calentamiento del planeta, reflejados en la salud de la población, los ecosistemas y los bienes materiales. Por ser una problemática multifactorial, el Estado de Baja California no está exento de ella y es observada principalmente en sus zonas urbanas densamente pobladas ocasionando presión sobre sus elementos ambientales. Por ejemplo, los resultados del sistema de monitoreo atmosférico de Baja California han revelado días sobre la norma para partículas menores a 10 micrómetros (PM10) en 3 de los 5 municipios del Estado (Tijuana, Mexicali y Ensenada), también se presentaron días con mala calidad del aire respecto a partículas menores a 2.5 micrómetros (PM2.5) en Mexicali y destaca que existen problemas con el ozono, principalmente en Mexicali.

Mexicali ha sido el municipio en presentar el problema más severo por PM10 con el mayor número de días malos en el periodo de análisis 2006 - 2016, en todos los años y en al menos una estación presenta alrededor o más del 50% de los días muestreados en color rojo, es decir con mala calidad del aire (muestreos por arriba de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Tijuana, Tecate y Rosarito también presentaron, aunque en un menor número, días en color rojo para este contaminante. Tales partículas son dañinas a la salud debido a que pueden penetrar y alojarse en el interior profundo de los pulmones. Su exposición crónica agrava el riesgo de desarrollar cardiopatías y neumopatías, así como cáncer de pulmón (COFEPRIS, 2017).

Particularmente en Baja California, las emisiones de PM10 surgen a partir de caminos no pavimentados (con un 45%); caminos pavimentados (27%); generación de energía eléctrica, camionetas y pick up, autos particulares, taxis, vehículos mayores a

3 toneladas y tractocamiones (14%), labranza (6%), incendios forestales (4%), y quemas agrícolas (3%).

En el período de análisis 2006–2016, en todas las estaciones donde se midió el contaminante PM2.5 se calificaron varios días con calidad del aire mala, el mayor número de días se registró en el municipio de Mexicali. A razón de poseer la peculiaridad de ser ultrafinas y fáciles de inhalar, las partículas PM2.5 incrementan los riesgos en la salud. Los efectos más documentados son la mortalidad y la hospitalización de pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y el incremento en la población asmática (Nadadur & Hollingsworth, 2015; Pope III & Dockery, 2006).

En Baja California, las emisiones de PM2.5 surgen a partir de labranza agrícola y entre otros (29%); caminos pavimentados (22%); caminos no pavimentados (15%); incendios forestales (12%); generación de energía eléctrica (11%); y quemas agrícolas (11%).

Parte de los objetivos del presente proyecto es cuantificar los principales efectos en la salud que se tienen por la exposición a los contaminantes del aire normados en Baja California. En términos del impacto en la salud, la presencia conjunta de partículas suspendidas y de ozono aumenta el riesgo en la población de presentar efectos agudos y crónicos, que van desde irritación de ojos, cefaleas, y dolor de garganta, hasta incrementos en la mortalidad por enfermedades cardiovasculares y cáncer de pulmón. La utilidad que genera reducir la contaminación del aire en el Estado no únicamente se traduce en mejorar la salud de la población, sino en el posible ahorro en los gastos que pertenecen al sector salud.

Es necesario que los municipios de Baja California incrementen su participación en medidas de ahorro de agua, la producción de energía limpia y uso de eficiencia energética, además de acciones de adaptación ante la crisis alimentaria, lo cual además del beneficio económico, traería múltiples beneficios socioeconómicos y ambientales para el Estado. Para este proceso es imprescindible fomentar políticas públicas que apoyen tales acciones de regulación ambiental. Así mismo, se debe reconocer que en zonas áridas se presenta un desafío mayor ya que los cambios climáticos extremos han representado una amenaza para lograr el bienestar social, debido a la disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de los sectores agua, energía y alimentos.

## 1.2. Objetivos de la investigación

### 1.2.1. Objetivo General

Desarrollar un estudio basado en optimización multiobjetivo que permita determinar escenarios factibles para satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos en Baja California, México, logrando seguridad entre los involucrados en el nexo agua-energía-alimentos ante efectos del cambio climático para la incorporación de acciones de gestión sostenible.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Elaboración del modelo matemático cuantitativo y cualitativo de producción para Baja California con incorporación de energías renovables y acciones de tecnificación.
- Simular y evaluar diferentes escenarios del modelo propuesto priorizando el cambio climático y la medición de los impactos en el nexo agua-comida-energía. Con ello se busca identificar interconexiones en el nexo y sus retos, es decir, diagnosticar las principales limitantes, beneficios e inconvenientes de la aplicación del nexo en el Estado bajo distintos escenarios.
- Construir un prototipo conceptual óptimo con incorporación de energías renovables a base de un objetivo multiobjetivo (maximización de generación energética, minimización de GEI y minimización de costos).
- Señalar la condición actual del enfoque nexo agua-energía-alimentos hacia la reducción del impacto ambiental en Baja California.
- Generar un modelo con enfoque nexo agua-energía-alimentos que pueda sustentar políticas públicas para resolver la problemática de Baja California.

## 1.3. Justificación y uso de resultados

De acuerdo con el informe 'World Water Development' (UNESCO, 2015), el mundo se enfrentará a una grave crisis de recursos en 2050 tomando en cuenta el aumento de población mundial, el crecimiento económico y la urbanización. Si además se considera el aumento de la producción alimentaria y de la demanda de energía, asociados a este desarrollo imparable de la humanidad, no es difícil predecir que Baja California presentará un estrés hídrico, alimentario y energético en un futuro.

El conocimiento propuesto que se busca aplicar en la región será el lograr un análisis tendencial argumentado con base en modelos matemáticos y simulaciones que

permitan prevenir comportamientos perjudiciales futuros entre el medio ambiente y el bienestar social en Baja California. Siendo presentados los resultados de este mismo estudio hacia la formulación de políticas públicas para minimizar conflictos y maximizar sinergias entre los tres sectores. De esta manera se empezarán a investigar cada vez más, mayores interdependencias entre los tres sectores.

Se busca en un futuro motivar a los tomadores de decisiones políticas de ser conscientes, no solo de los beneficios, sino de los inconvenientes de implementar proyectos en el estado sin tomar en cuenta la perspectiva del nexo agua-energía-alimentos y su relación con la salud y bienestar social de los bajacalifornianos. Proyectos que parecen beneficiosos pueden no serlo del todo sin tomar esta perspectiva, por ejemplo, las modernizaciones de riego, que si bien ahorran agua, incrementan el consumo de energía; O bien, la producción de biocombustibles disminuye la dependencia del petróleo pero afecta y encarece la producción de alimentos. Así como los subsidios a precios de la energía pueden incrementar la producción agrícola, llevan a la sobreexplotación de los acuíferos (CEPAL, 2016). Por lo que reducir lo más posible o incluso eliminar los conflictos entre sectores es el objetivo principal que se busca hacer en esta investigación, siendo los principales beneficiarios los habitantes del estado.

El conjunto de actividades económicas al alza en Baja California describe un acelerado desarrollo económico y expansión de zonas urbanas, incrementando la demanda de un mayor consumo de bienes, servicios y de combustibles, y consecuentemente la contaminación y gases de efecto invernadero. Los movimientos migratorios también apoyan al incremento de población en el estudio. Entre 2015 y 2020, 211 416 personas llegaron a vivir a Baja California, procedentes del resto del país (INEGI, 2020). De igual manera, las variables económicas y la relación nexo-cambio climático serán analizadas en el modelo de optimización propuesto para detallar los datos de áreas de interés en la proyección de soluciones ante problemáticas específicas del Estado, mediante la predicción de escenarios futuros. Al incorporar objetivos ambientales, económicos y sociales se busca obtener seguridad hídrica, energética y alimentaria en Baja California al satisfacer con éxito las necesidades de la población.

El enfoque del nexo agua-energía-alimentos permite dinamizar el cumplimiento de los objetivos (económicos, ambientales y sociales) de las estrategias de desarrollo nacional de los países. Al mismo tiempo, favorece el cumplimiento de los compromisos internacionales adquiridos, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fijados

en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París sobre Cambio Climático. La finalidad del presente estudio, además de otros objetivos, es apoyar el cumplimiento de la Agenda 2030 a través de la coordinación de inversiones que reduzcan los impactos ambientales y promuevan el desarrollo sustentable. Al promover políticas coherentes con el desarrollo sustentable que integren múltiples sectores, se espera que el riesgo de debilitarse entre sí disminuya, garantizando el uso sostenible de los recursos (Weitz, Nilsson y Davis, 2014).

De manera directa, los ODS relacionados con el nexo agua-energía-alimentos son el Objetivo 2: hambre cero, el Objetivo 6: agua limpia y saneamiento, y el Objetivo 7: energía asequible y no contaminante. De forma indirecta, a través de interconexiones menos estrechas, la innovación que alcanza el enfoque nexo logra enlazar acciones vinculadas al clima y la tierra (Objetivo 13), pueden generar impactos en los ecosistemas (Objetivo 15), y conllevan a alianzas intersectoriales (Objetivo 17). De tal forma, el nexo agua-energía-alimentos ayuda a cumplir planes y compromisos nacionales, y acuerdos adquiridos a nivel internacional.

#### 1.3.1. Antecedentes

En el informe 'Our Common Future' se define el Desarrollo Sostenible como "aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para satisfacer sus propias necesidades" (Brundtland, 1987). Si se extiende el concepto, podemos hablar de la sociedad sostenible, aquella que no agota su base de recursos al exceder su producción sostenible ni produce más contaminantes de los que pueda absorber la naturaleza al paso de las generaciones (Nebel & Wright, 1999). Bajo este significado, numerosas conferencias, iniciativas de investigación y proyectos relacionados al nexo agua-energía-alimentos han tomado lugar alrededor del mundo. Por ejemplo, el Programa Alimentos-Energía lanzado por la Universidad de Naciones Unidas (UNU) para reconocer la interdependencia entre los conflictos de alimentos y energía (Sachs and Silk, 1990).

De forma más reciente, las sociedades necesitan un enfoque que les ayude a conocer mejor las complejas y dinámicas relaciones entre el agua, la energía y los alimentos para poder usar y administrar sus recursos en forma sostenible (Tejedor Flores, 2018).

Nuevos estudios destacan la investigación de los Cuadernos de Salud Pública (CPS, 2019), donde se permitió profundizar en los derechos humanos esenciales inherentes a la salud a través del concepto de nexo agua-energía-alimento. El objetivo fue investigar sinergias y contradicciones basadas en prácticas sociales en el nexo urbano en el barrio de Novo Recreio en la ciudad de Guarulhos, Gran São Metropolitano Paulo, Brasil, donde finalmente se indica que el contexto de escasez corrobora las prácticas que pueden ser contradictorias en relación con los desafíos de sostenibilidad y derechos sociales. Los resultados destacaron prácticas sociales asociadas con la sistemática falta de agua, alumbrado público, transporte, y difícil acceso a alimentos frescos y saludables. Gracias a ello el estudio define el nexo de exclusión como condición periférica de imposibilidad de opciones conscientes que permitan orientar conjuntamente la reducción del desabastecimiento e iniquidades a través de alternativas para la sustentabilidad.

De igual manera, la aplicación del nexo en el sector salud también tiene un efecto indirecto en su mismo desarrollo; tal como se realizó en la Electrificación de la última milla del corredor seco mesoamericano en 2020, donde se presentó una estrategia para resolver el trilema alimentación, agua y energía según los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS). La estrategia asistió a las comunidades sin acceso a la red de energía, situación habitual en el corredor seco mesoamericano, y va encaminada a la electrificación de la última milla, donde se propuso: (i) aumentar el acceso al agua y a la energía de forma local, (ii) mejorar la eficiencia energética en todas las etapas de la cadena de suministro; (iii) utilizar exclusivamente energías renovables endógenas; (iv) manejo sostenible de recursos forestales; y (v) garantizar la seguridad alimentaria. Como el estudio concluye, el acceso a la electricidad es un factor clave para el desarrollo. A su vez, organizaciones internacionales como el Banco Mundial o la Agencia Internacional de la Energía aseguran que el acceso a la electricidad lleva asociadas mejoras en las condiciones socioeconómicas, de salud, educación y equidad de género (Kanagawa and Nakata, 2008).

Un ejemplo del uso de la electricidad en la salud lo indica la Red Global de Hospitales Verdes y Saludables, que muestra cómo el sector de la salud consume enormes cantidades de energía proveniente de combustibles fósiles. Los hospitales ocupan el segundo lugar en la lista de edificios con mayor consumo de energía en los Estados Unidos. Con la expansión del sector salud en muchos países en desarrollo,

también crece su consumo de energía. En Brasil, por ejemplo, los hospitales representan el 10.6% del total del consumo energético comercial del país. Al mismo tiempo que cientos de miles de hospitales y clínicas de todo el mundo carecen de un suministro de electricidad confiable, o directamente no tienen acceso a ella. Hay que tomar en cuenta también que en la mayoría de los hospitales de grandes dimensiones, de estilo occidental, el procedimiento operativo estándar requiere un consumo de energía significativo —para el calentamiento de agua, los controles de temperatura y humedad del aire en interiores, la iluminación, la ventilación y numerosos procesos clínicos— que no solo genera grandes costos financieros y emisiones de gases de efecto invernadero; sino que, en relación con los apagones inesperados provocados por la problemática energética y falta de coherencia en políticas públicas en el estado, el principal afectado será la población.

Más a detalle respecto al nexo agua-energía-alimentos, en el año 2015 se realizó un estudio a través de 37 proyectos seleccionados, donde cuatro tipos de investigación de nexos fueron identificados incluyendo agua-alimento, agua-energía-alimento, y agua-energía y clima. Entre ellos, seis proyectos (16%) tenían una estrecha vinculación con agua-alimentos, 11 (30%) con agua-energía-alimentos, 12 (32%) con agua-energía y 8 (22%) con clima. Las regiones se dividieron en Asia, Europa, Oceanía, América del Norte, América del Sur, Oriente Medio y África. América del Norte y Oceanía tenían una tendencia a centrarse en un tipo de nexo específico, agua-energía (46%) y clima (43%), mientras que África se centraba menos en agua-energía (7%). Concluyeron dos definiciones de nexo en la literatura: como la interrelación entre diferentes recursos (Sanders and Webber, 2012) y como un enfoque novedoso para investigar sistemas de nexo con varios significados en diferentes contextos (FAO, 2014). A pesar de las diferencias entre las dos definiciones anteriores, podemos concluir que se propone el nexo para pedir una integración gestión de los tres sectores mediante la coordinación intersectorial para reducir las compensaciones sectoriales inesperadas y promover el desarrollo sostenible de cada sector. En este sentido, se diferencia de las prácticas convencionales de toma de decisiones que antes se consideraban dentro de disciplinas separadas (Liu et al., 2015). Además, se identifica que el significado de nexo es tan extenso que no existe un enfoque único aplicable en todas las situaciones, sin embargo, el método apropiado debe seleccionarse teniendo en cuenta las prioridades de investigación, sus objetivos, escalas y disponibilidad de datos del sistema nexo. Por ejemplo, el Modelo CGE es más apropiado para investigar macroeconomía y cambio

ambiental a nivel regional y global. Mientras ABM es mucho más adecuado para revelar los impactos de los individuos (Zhang et al., 2018).

Es importante recalcar que se requiere de gran manera expandir los indicadores del nexo que nos permitan monitorear y diseñar nuevas políticas públicas. Los inicios de poder cuantificar al nexo fueron dirigidos a su conceptualización principalmente (Wicaksono et al., 2017); y posteriormente, a la creación de herramientas de monitoreo tal como en la Asociación para la investigación y la innovación en el área mediterránea (Saladini et al., 2018) donde se escogieron 12 indicadores para ser monitoreados, los cuales fueron: Índice de Pobreza Multidimensional (IPM); población con sobrepeso (%); uso del suelo(%); emisiones de GEI (total y AFOLU) (tCO<sub>2</sub>e); rendimiento de cereales (kg/ha); valor agregado agrícola (US\$/trabajador); consumo de fertilizantes (kg/ha, tierra cultivable); productividad del agua de cultivo (kg/m<sup>3</sup>); extracción anual de agua dulce para la agricultura (%); población atendida que utiliza un servicio de agua gestionado de forma segura (rural,%); población atendida con saneamiento gestionado de forma segura (rural,%); y cantidad de residuos agrícolas utilizados con fines energéticos (t). Los conjuntos de datos para estos indicadores fueron recopilados por organismos internacionales como el Banco Mundial, la OMS, la FAO y la CMNUCC. Siguiendo este tipo de investigación, Endo, et al. (2017) adoptaron un enfoque cuantitativo del nexo utilizando datos secundarios incluidos en publicaciones académicas disponibles públicamente en revistas y en la web desde la perspectiva del tipo de nexo (nexo agua-alimento, nexo agua-energía, nexo agua-energía-alimento y nexo relacionado con el clima), y su alcance. Indican, que hasta junio del 2014 no existe una definición clara del término “nexo” y destacan que el tamaño del presupuesto, el año de lanzamiento del proyecto y el período de los proyectos con enfoque nexo no son identificados claramente debido a información limitada. Finalmente, para comprender el estado actual de la investigación del nexo, Shannak, Mabrey, & Vittorio, (2018) realizaron una revisión sistemática de los últimos 15 años en literatura académica sobre el modelado del nexo agua-energía-alimentos, donde se identificaron dos desafíos principales y consideraciones clave: primeramente, las interacciones y dinámicas complejas entre el agua, la energía y los recursos alimentarios constituyen un gran desafío, y en segundo lugar la complejidad de recopilar datos de entrada para un modelo espacial-temporal. En la misma investigación, se identificaron nueve modelos del nexo sobre la planificación integrada de los recursos naturales donde destacan los modelos: Seguridad ambiental de los medios de vida (Environmental Livelihood Security) y el

Marco agua-energía-alimentos por ICIMOD (Water-Energy-Food Framework) debido a su alcance a nivel región, que es el buscado en el presente trabajo. Para trabajar en las limitaciones que había tenido el concepto de nexo agua-energía-alimentos, especialmente los problemas que enfrenta el 'nexo agua-energía', Dai, et al. (2017) realizaron una investigación en literatura científica reciente sobre el nexo agua y energía. Los estudios revisados se clasificaron y evaluaron de acuerdo con agrupaciones basadas tanto en la escala geográfica como en su "ámbito de nexo". Donde nuevamente se destacan los estudios integrales a escala regional como la Evaluación y planificación del agua (WEAP), y la Planificación de alternativas energéticas a largo plazo (LEAP); que tienen como principal objetivo cubrir las necesidades políticas y buscar apoyo a la toma de decisiones centrándose en metas y objetivos para agua, energía, clima, y medio ambiente.

Uno de los primeros acercamientos de modelos en el sector hídrico hacia el nexo ha sido en el estudio de Giupponi y Gain (2016); donde no se disponía aún de enfoques cuantitativos e integrados para el análisis espacial de la seguridad hídrica a nivel mundial. En la investigación se creó un marco de análisis espacial de criterios múltiples para proporcionar una evaluación global de la seguridad del agua. El índice global de seguridad del agua (GWSI) es conceptualizado y calculado, y permite explorar la sensibilidad de los mapas a diferentes actitudes hipotéticas de los tomadores de decisiones de políticas públicas. Finalmente, se dedujo que los países de África, el sur de Asia y Medio Oriente experimentan una seguridad hídrica muy baja. Otras áreas como algunas partes de los Estados Unidos, Australia y el sur de Europa, mostraron en su momento mejores valores de GWSI debido al buen desempeño de la gestión, seguridad, calidad, y accesibilidad. Dado el objetivo de explorar la viabilidad de proponer un método de evaluación que pueda contribuir a la implementación futura de los ODS, una limitación muy marcada que tuvo el estudio es el no poder demostrar explícitamente las áreas en las que se están logrando las metas de los ODS. De manera similar, los pesos de los indicadores requerirán una consideración cuidadosa con la participación de las partes interesadas relevantes y un análisis de sensibilidad en profundidad. El GWSI se propuso como un medio para monitorear el progreso hacia los ODS en los próximos años, y su evaluación del desempeño espacial y temporal permitirá identificar las necesidades específicas de mejora en cada país.

A modo de resolver la falta de una base unificada para el análisis de los flujos de agua y energía, Wang, Cao, & Chen (2017) propusieron un análisis de entrada-salida (IO, por sus siglas en inglés) modificado para equilibrar el uso urbano de energía y agua en la ciudad de Beijing, China. Ellos descubren que al multiplicar la relación energía-economía a lo largo de las cadenas de suministro, permite dar lugar a un "nexo jerárquico". La implicación de tal concepto significa no sólo los impactos indirectos de la energía o agua entre sí, sino también la jerarquía de las cadenas de suministro de energía y agua, lo que puede conducir a diferentes puntos de enfoque para la gestión integrada de los recursos. La misma metodología de IO fue incorporada en Reino Unido por Owen, Scott, & Barrett (2018) para el cálculo de consumo de energía, agua y alimentos para el periodo de 1997-2013. Identificaron cadenas de suministro críticas mediante el análisis de ruta estructural y establecieron el "Productos Nexus", concepto que tiene un gran impacto en términos de energía, agua y alimentos totales utilizados en la producción de los sectores, siendo estos los productos prioritarios para la toma de estrategias de reducción. Sus resultados fueron cuantitativos al utilizar conjuntos de datos de código abierto siendo fácilmente disponibles.

Con motivo de coordinar la utilización de recursos hídricos y la mitigación del CO<sub>2</sub> en China, Fang y Chen (2018) utilizan el enfoque de análisis de entrada-salida multirregional (MRIO, por sus siglas en inglés) para modelar impactos ambientales tomando en cuenta la cadena de suministro completa, contaminación y consumo respectivo de recursos en cada etapa de producción, lo que puede mostrar las interrelaciones de varios sectores dentro de una economía. Los resultados pudieron cuantificar que mientras las principales ciudades exportadoras de productos están bajo estrés hídrico severo y tienen estrictos objetivos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, las ciudades importadoras podrían transferir el estrés hídrico y las emisiones de CO<sub>2</sub> hacia otras regiones a través de la cadena de suministro.

Con la finalidad de evaluar el estado de sostenibilidad de agua-energía, y mejorar su uso sostenible, Wang, et al. (2018) aplicaron el modelo de presión, estado y respuesta (PSR) para seleccionar índices de evaluación. El modelo PSR consta de tres índices principales: presión, estado y respuesta; quienes interactúan y se restringen mutuamente, por lo que el modelo hace hincapié en las relaciones entre el medio ambiente, presión y degradación ambiental, e influye en todo el proceso de toma de decisiones. Sus resultados permiten clasificar la sostenibilidad del nexo agua, energía

y alimentos (AEA) en rangos: bajo, general y alto; lo que permite ver una mejora, estancamiento o decrecimiento de sostenibilidad del nexo AEA en un sitio determinado. Este enfoque llena el vacío existente en los estudios cuantitativos sobre la sostenibilidad del nexo AEA, pero al buscar llenar el vacío en el análisis cuantitativo de sus sinergias, se desarrolló un modelo de evaluación basado en la teoría de la sinergia y entropía de la información por Zhang, et al. (2020). Modelo validado al aplicarse en la ciudad de Bayannur, China. Sus resultados indicaron que los suministros de agua podrían ser el factor más crítico que afecta la estabilidad del sistema de estudio; por lo que se propusieron soluciones tales como la optimización de riego integrado de agua y fertilizantes, ajustar la estructura de suministros de energía, así como la estructura de plantación de cultivos o bien, la implementación de energías renovables.

Para rastrear la distribución espacial para el origen y destino de flujos de energía-agua en Shanghái en múltiples escalas económicas en el año 2010, Nawab et al. (2019) construyeron un marco de nexo urbano agua-energía basado en el modelo EE-MSIO. Sus resultados muestran que es posible evaluar las cargas ambientales de producción y el consumo, diferenciando entre exportaciones e importaciones con el modelo. Debido a que la importación de energía y agua en Shanghái fue mayor que su exportación, este estudio concluye que un enfoque basado en el consumo es más apropiado para evaluar la explotación del medio ambiente.

En búsqueda de soluciones ante la escasez de agua en climas áridos, Boluwade (2021) proporciona indicadores cualitativos dentro del nexo agua, energía y alimentos utilizando el lenguaje de modelado unificado (UML). El estudio identificó que la falta de observación fue la estrategia faltante para la efectiva mitigación de los impactos del cambio climático. Se concluye principalmente que la aplicación de sistemas modernos de riego presurizados sería un mejor sustituto en las prácticas agrícolas y debería haber una reducción de los subsidios al agua sin contribuir a otros problemas socioeconómicos.

Debido a resultados de gestión desfavorables del agua y agricultura en Ghana, Opoku et al. (2022) proponen el modelo de matriz de interconexiones del nexo agua, energía y alimentos para evaluar la demanda anual de agua para la generación de energía, producción de alimentos y demanda doméstica socioeconómica a escala nacional. El estudio concluye y sugiere que para lograr la sustentabilidad en el sector hídrico es imperativo emplear avances tecnológicos para reducir efectivamente la

intensidad de agua de varios usos de agua dulce en el país. De lo contrario, la demanda anual hídrica tendría un aumento del 34% hacia el año 2030. Un indicador del estado de sostenibilidad en un sitio es el conocimiento necesario para lograr un desarrollo integrado en Baja California y el uso posterior de ese conocimiento como base para la toma de decisiones e implementación es imprescindible hoy en día.

Siguiendo estrategias de daño mínimo a los recursos hídricos subterráneos en zonas áridas, Radmehr, Ghorbani, y Ziaei (2020) plantean un enfoque de programación no lineal de toma de decisiones (MCDM) en la cuenca de Neishabur en el noreste de Irán. Donde las principales variables fueron los suministros de agua subterránea para la agricultura, el hogar y la industria; suministros de energía para el suministro de agua y alimentos; y la superficie cultivada de alimentos. De sus resultados partieron soluciones que podrían usarse para definir estrategias de políticas óptimas para la gestión sostenible de recursos y, al mismo tiempo, lograr objetivos económicos y ambientales.

Norouzi (2021) presentó un modelo conceptual de interconexión agua-alimento-energía utilizando un sistema dinámico y los factores que afectan esta relación. Posteriormente, modeló cada uno de los subsectores de agua, alimentación y energía, permitiendo calcular el índice de productividad económica agua-energía-alimentos para 2005-2018 para Irán. Sus resultados muestran la necesidad de prestar atención a este vínculo en la formulación de políticas y la regulación en Irán, e indicó a su vez que el desarrollo político de los diversos sectores involucrados es una estrategia para lograr un consenso y una base común.

Como uno de los acercamientos del nexo agua-energía-alimentos a México se tiene que el Dr. Peniche Camps (2021) ha mostrado avances desde la perspectiva de la economía ecológica en el caso mexicano. Confirma que el modelo de Nexos constituye una mayor eficiencia en el uso de los recursos a largo plazo, pues al limitar los criterios de sobreexplotación derivados de las estrategias de maximización de ganancias de las compañías transnacionales que se han establecido en el campo mexicano, se incorporan factores que determinan un mejor uso de los recursos naturales. A su vez, menciona que es de suma importancia orientar el modelo de desarrollo hacia una nueva racionalidad ambiental además de la aplicación de políticas de gestión del medio ambiente. Indica también, que es prioritario llevar a cabo el seguimiento de una nueva

estrategia económica que pondere los acervos de recursos naturales y energéticos, y que sean compatibles con los indicadores biofísicos del desarrollo propuestos en el diseño de políticas públicas.

Partiendo de la importancia de la sostenibilidad es importante destacar la investigación de Zhang, et al. (2021), donde propusieron un marco de la huella para el nexo agua, energía y alimentos en las regiones de Guangdong, Hong Kong y Macao mediante el modelo EE-MRIO. Los resultados indicaron que la huella energética era 5.3 veces mayor que la relacionada con los alimentos y el agua. Las huellas energéticas relacionadas con los alimentos fueron 3.8 veces mayores que las huellas hídricas. Sus principales incertidumbres fueron al compilar el MRIO, lo que tiene un impacto en los resultados de los flujos interregionales y la confiabilidad de la huella. El marco de huella propuesto podría servir como herramienta para medir los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Explorar la viabilidad de proponer un método de evaluación que pueda contribuir a un mayor alcance de los ODS, no solo implica identificar las interrelaciones agua-energía-alimentos, a su vez es necesario tener en cuenta el bienestar social de la población en todo momento. Por ello, la implementación de acciones ante el cambio climático o hacia la implementación óptima de los ODS es un tema en el que se requiere un extremo cuidado y nivel de estudio que permita el análisis ambiental, social, económico y de salud en los tres sectores del nexo. Por ejemplo, el desarrollo de represas mejora la seguridad del agua, los alimentos y la energía, pero a menudo tiene impactos negativos en la salud humana, en ese momento se deja de lado el bienestar social de la población. Una investigación al tema fue realizada por Lund, et al. (2022) donde evaluaron la transmisión de parásitos del género *Schistosoma spp* en la cuenca del río Senegal, África, tomando la perspectiva del nexo agua, energía y alimentos. Utilizaron el análisis de contenido cualitativo de documentos disponibles para examinar la salud como un componente del nexo alimentos, energía y agua y lograron comprender las prioridades entre los sectores. Encontraron que la salud se reconoce como un componente importante del desarrollo de la cuenca fluvial, pero se considera mínimamente en la forma en que se operan las represas en la práctica. En su lugar, se priorizan objetivos como la energía hidroeléctrica y la agricultura de regadío. Encontrar casos de estudio de este tipo es el primer paso para el logro de maximización de las sinergias en el nexo agua, energía y alimentos.

Debido a la controversia sobre si el nexo agua-energía-alimentos puede utilizarse como una nueva base política, Yan, Fang, y Mu (2019) analizaron los mecanismos internos del nexo mediante la construcción de un modelo SVAR (regresión automática de vectores estructurales) utilizando datos de China. Los resultados mostraron que para acelerar el ritmo del desarrollo de la agricultura inteligente en China, es recomendable aumentar las inversiones en la producción de granos con uso intensivo de energía (o uso intensivo de tecnología) en lugar de promover el uso intensivo de agua. Finalmente, dado que el estudio se basó en los datos de China de 1997 a 2016, no puede cubrir todas las características y solo refleja las características del nexo agua-energía-alimentos en una etapa. Debido a datos limitados, algunas de las relaciones aún no están claras.

Saladini, et al (2018) buscan fomentar un programa integrado de producción sostenible de alimentos y suministro de agua en el marco del nexo agua-energía-alimentos. Bajo la Asociación para la Investigación y la Innovación en el Área Mediterránea (PRIMA), se desarrolló una herramienta de monitoreo basada en un conjunto de indicadores en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 2 y 6) eligiendo 12 indicadores. Los resultados lograron proporcionar una idea de la situación actual de la región del Mediterráneo y servir como referencia para monitorear el desempeño futuro de los países de la región. Para cada país, los diferentes indicadores se han normalizado a un rango de valores entre 1 y 10, donde a mayor distancia al centro mayor nivel de sostenibilidad para ese indicador.

Para abordar desafíos referentes en la seguridad del agua, energía y alimentos (AEA), Putra, Pradhan, & Kropp (2020) llevan a cabo un análisis sistemático del nexo AEA en el sur de Asia mediante el uso de fuentes de datos abiertas a escala de país, donde se utilizaron 36 indicadores para el período 1961–2016. Se aplicó la correlación de rangos de Spearman ( $\rho$ ), definiendo correlaciones positivas y negativas entre los indicadores de seguridad del nexo. Los resultados señalaron que el indicador de recursos hídricos per cápita tiene una interacción sinérgica con la reducción de emisiones del sector energético en la mayoría de los países del sur de Asia, se estima que el uso de hidroelectricidad en estos países podría ser una razón para tales correlaciones positivas. Esto es traducible a que se tiene un gran potencial de generación hidroeléctrica que puede desarrollarse aún más para garantizar seguridad

energética (Rasul, 2015). Sin embargo, se ha concluido que el sur de Asia tiene más compensaciones que sinergias dentro del agua y la energía, por compensación se refiere a que el progreso en uno obstaculiza el progreso en otro, por lo que en el proyecto se enfatiza la necesidad de un desarrollo hidroeléctrico sostenible que considere otros usos del agua, por ejemplo el flujo natural mínimo para los ecosistemas.

Para superar las limitaciones de recursos en comunidades rurales desfavorecidas, Cansino-Loeza, Tovar-Facio, & Ponce-Ortega (2021) han planteado la optimización del nexo AEA para impulsar su desarrollo económico mediante la correcta gestión de los recursos disponibles. En este trabajo se determinó la combinación óptima de tecnologías para suplir las demandas de servicios públicos y la variedad de alimentos para cubrir los requerimientos nutricionales. El modelo es un programa lineal íntegro mixto estocástico, y considera el cambio de población, y la demanda de agua y energía como parámetros. Para mostrar la aplicabilidad del enfoque propuesto, se tomó como caso de estudio a la comunidad de Cochoapa el Grande, Guerrero. Los resultados muestran que es factible crear un sistema autosuficiente utilizando tecnologías renovables y considerando el tratamiento de residuos. Para producir electricidad, por ejemplo, se proponen paneles solares y unidades de cogeneración (Motores de Combustión Interna, Pilas de Combustible, Microturbinas y Motores Stirling, tecnologías buenas para ser instaladas en lugares donde la conexión a la red eléctrica es difícil y consumen menos combustible que los sistemas convencionales). Con esta integración propuesta, es posible reducir el índice de pobreza y marginación en un 8% anual. El modelo también permite proponer tecnologías de conversión de residuos en energía para producir combustible para las necesidades energéticas y es capaz de determinar la producción óptima de alimentos para disminuir la desnutrición. Sin embargo, el impacto de la incertidumbre debe ser considerado en el modelo.

Para demostrar los impactos de la sustentabilidad de la desalinización para la agricultura, se aplica el nexo agua, energía y alimentos a 54 plantas desalinizadoras de propiedad privada que tratan agua subterránea salobre para uso agrícola en el Valle de San Quintín de Baja California, México. Se utilizó el software NVIVO para organizar y codificar documentos, y mejorar la comprensión de la coordinación, anticipación, inclusión y atribución de los sectores del nexo. Encontraron que la agricultura habilitada por la desalinización es actualmente social y ambientalmente insostenible en el Valle de San Quintín a largo plazo. Concluyen que es necesario mejorar las brechas de datos

actuales, como la eliminación de salmuera y las emisiones de GEI asociadas con la desalinización para construir datos comparativos en la implementación de la desalinización y sus resultados de sostenibilidad.

Rodríguez-Gutiérrez, J., Castillo-Molar, A. y Fuentes-Cortes, L. (2022) presentaron como caso de estudio una comunidad rural fuera de la red en Tzitzio, Michoacán. Se enfocaron en un modelado de programación no lineal multiobjetivo con estructura tecnológica de un sistema híbrido de energía fotovoltaica y eólica acoplado a los servicios hídricos para satisfacer las demandas de vivienda y agricultura, y se propuso el cambio de la agricultura a la piscicultura. Los resultados muestran conflictos entre el desempeño económico del sistema y los componentes del nexo. A su vez, se pudieron determinar sobreexplotaciones de fuentes de agua cercanas debido a la implementación del estanque.

Medina-Santana, Flores-Tlacuahuac, Cárdenas-Barrón y Fuentes-Cortés (2020) propusieron un modelo de programación no lineal multiobjetivo. Se realizan experimentos numéricos utilizando datos de una comunidad en Michoacán, México. Es desarrollada la formulación matemática que incluye tecnologías de energía renovable, dispositivos de gestión del agua, cultivos alimentarios y energéticos. Los resultados mostraron la utilidad del modelo para encontrar el tamaño óptimo y el nivel operativo del equipo, así como la selección óptima de cultivos. Además, permite analizar los beneficios potenciales de algunas estrategias de desarrollo, como políticas de precios de los biocombustibles, las mejoras en el rendimiento de los cultivos energéticos y reducción de costos.

Fuentes-Cortés, González-Bravo, Flores-Tlacuahuac, y Ponce-Ortega (2018) utilizaron un modelo de Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP) multiobjetivo para definir la configuración y tamaño del sistema de suministro de agua y energía en comunidades rurales de bajos ingresos. Los resultados muestran que los sistemas de baterías permiten reducir el impacto económico y ambiental, y la inclusión de sistemas de bombeo promueve la disponibilidad de agua y mejora el impacto social de los sistemas tradicionales fuera de la red. Además, la inclusión de sistemas de energía renovable y tecnologías basadas en biocombustibles pueden desarrollar sistemas agrícolas de riego en lugar de las condiciones actuales de agricultura estacional.

Cansino-Loeza y Ponce-Ortega (2020) abordaron un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MILP). El modelo está sujeto a balances de masa y energía para cubrir las demandas domésticas en los municipios que conforman la región de La Laguna, México; así como cubrir demandas en los sectores industrial, agrícola y ganadero. Los resultados obtenidos muestran que la reutilización del agua es una alternativa de suministro de agua que reduce la extracción de agua dulce y es crucial para mejorar la sostenibilidad del Nexo Agua-Energía-Alimentos. Asimismo, se encontró que el sector más afectado por la escasez de agua es el sector agrícola.

Núñez-López, Rubio-Castro, El-Halwagi y Ponce-Ortega (2018) presentan un modelo de programación lineal entero mixto multiobjetivo del nexo agua-energía-residuos en un conjunto residencial de la ciudad de Morelia, México. Sus objetivos son la minimización simultánea de costos y minimización del consumo total de agua dulce. El diseño propuesto incluye un motor de combustión central para producir electricidad, un sistema de recolección de agua de lluvia y un sistema tratamiento de aguas residuales. Para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas se incorpora un sistema de cultivo de algas, las cuales pueden procesarse aún más para producir biocombustibles. Los resultados fueron exitosos.

Como se puede notar, cada método de investigación ofrece avances destacables sobre el análisis de los recursos e intentan diferentes métodos para observar su interrelación con el mayor índice de sustentabilidad posible. Todo depende del enfoque que se le quiera dar, además de los recursos disponibles para analizarlo. Se reconoce en cada una de estas investigaciones y modelos que las interacciones directas e indirectas del nexo son complejas y las estrategias tomadas deben ser sustentadas bajo las mayores necesidades del área de estudio, que varía de región a región, ya que puede generar discrepancias de la realidad siendo un sistema tan sensible. Lo que se busca en el presente análisis es apoyar el desarrollo de un marco genérico que considere las interrelaciones entre los sistemas para la población de Baja California y ofrecer a los tomadores de decisiones políticas una base sólida para el debate, discusión y acción de una estrategia integradora hacia la gestión de nuestros recursos.

#### 1.4. Hipótesis

El desarrollo de un modelo de análisis numérico, enfocado en mitigar los efectos del cambio climático y mejorar el bienestar social en la plataforma de optimización matemática GAMS, permitirá estimar y mejorar los índices de seguridad energética, hídrica y alimentaria en la entidad federativa de Baja California, abordando el sistema como un todo interconectado. A través de esta integración, se podrán satisfacer al 100% las demandas de la población, considerando aspectos económicos y ambientales.

## CAPÍTULO II

### 2. Marco teórico

#### 2.1. Nexos agua-energía-alimentos

La relación que existe entre el agua, la energía y los alimentos es extensa. En promedio, en la agricultura se ocupa el 70% del agua que se extrae en el mundo, y las actividades agrícolas representan una proporción aún mayor del "uso consuntivo del agua" debido a la evapotranspiración de los cultivos. Más de 330 millones de hectáreas cuentan con instalaciones de riego a nivel mundial. La agricultura de regadío representa el 20% del total de la superficie cultivada y aporta el 40% de la producción total de alimentos en todo el mundo (FAO, 2017). Por tal razón, el mayor usuario global de agua es la agricultura, la cual se encuentra expuesta a los impactos del cambio climático, al desarrollo socioeconómico y al crecimiento poblacional (Gerten *et al.*, 2020; Ward & Pulido-Velázquez, 2008).

La intensificación y frecuencia en constante aumento de la escasez de agua en la agricultura afecta la producción de alimentos, lo que a su vez amenaza la seguridad alimentaria. Es por esta razón que una de las claves para el desarrollo adecuado de la sociedad consiste en entender mejor la escasez hídrica bajo el cambio climático, su relación con el incremento en la demanda de alimentos y la influencia que esta ejerce sobre su producción (FAO, 2018). Para el caso de Baja California, la cuantificación del uso del agua para la producción de alimentos en la agricultura será de vital importancia, sobre todo para aquellos cultivos que son muy demandantes desde el punto de vista hídrico (por ejemplo, la producción de nuez y algodón).

De la misma manera para generar electricidad se requieren cantidades cercanas al 15% del agua dulce para enfriamiento de plantas de poder, extracción de gas shale y otros combustibles, además de la producción de biomasa (Tsolas, Karim, & Hasan, 2018; WWAP, 2017a). Por otra parte, cerca del 30% de la energía es requerida para la producción y distribución de la comida. La comida cultivada representa cerca del 70% del consumo humano y hoy cada vez más se usan los alimentos para generar energía como biocombustibles, alrededor del 2% de los cultivos (Paschalidou, Tsatiris, & Kitikidou, 2016). El uso de la biomasa para generar energía representa un 14% de la energía global (Paschalidou *et al.*, 2016). Razones por las que los tres sectores se encuentran ligados.

En la actualidad, la pobre planificación urbana y la creciente presión al ambiente por un rápido crecimiento demográfico han llevado a que recursos como el agua, la energía y los alimentos vayan encareciendo en su capacidad de ser distribuidos de forma igualitaria, y a su vez rebajando el acceso de oportunidades para las comunidades más vulnerables.

El agua, la energía y los alimentos son imprescindibles para la salud humana, y son sectores que nos permitirán alcanzar un equilibrio e interacción entre los aspectos social, económico y ambiental hacia el desarrollo sustentable. El análisis en conjunto de estos sectores nos permite entender cómo se interrelacionan y a construir sinergias. La importancia de las sinergias radica en el efecto conjunto adicional que se puede esperar a comparación de continuar rigiendo cada sector por separado, en otras palabras, en caso de accionar de forma aislada, ninguno de los sectores generaría los beneficios que se tienen al accionar de acuerdo a la relación mutua que existe entre el agua, la energía y los alimentos. Por ejemplo, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) indica que una población creciente que cambia cada vez más su dieta hacia productos “hambrientos de agua”, debe hacer todo lo posible para mejorar la forma en que utilizamos el agua en la agricultura y aprovechar al máximo los recursos hídricos limitados.

El nexo agua-energía-alimentos surge como la oportunidad de entender la relación entre el agua, la energía y los alimentos, con motivación a promover la seguridad de los sectores en la creación de una sustentabilidad urbana y como medida de adaptación al cambio climático. Podemos incluir que el cambio climático ejerce presión en la seguridad hídrica al provocar fenómenos meteorológicos extremos cada vez más frecuentes e intensos, como sequías e inundaciones, con un impacto devastador en los sistemas de producción de alimentos. Entonces es buen momento para promover la gestión del agua como medida de adaptación a la variabilidad climática e intentar aumentar la resiliencia de la población ante este tipo de amenazas ambientales. Respecto al sector energético, las fuentes de energía renovable se ven afectadas por los cambios en los patrones de precipitación, temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento o la disponibilidad del agua (Yalew et al., 2020). Cabe destacar que el sector energético es fundamental para el desarrollo sustentable, ya que favorece el progreso económico y social de la población. La energía es enlazada en gran medida con la seguridad alimentaria, lo que es traducido en que uno de los obstáculos primordiales para la reducción del hambre y la desnutrición es la escasez

energética, teniendo incluso un papel clave en insumos agrícolas y los costos de producción de alimentos. Los retos a los que se enfrenta el sector energético tienen numerosas interrelaciones, por lo que requieren de enfoques integrados (o de 'nexo'). Tal enfoque nos permite abordar desafíos que vayan acorde con las necesidades hídricas, energéticas y alimentarias bajo el contexto futuro.

## 2.2. Simulación

La simulación es la experimentación teórica de un fenómeno modelado. Al modelar un fenómeno mediante ecuaciones matemáticas, es posible ver el comportamiento de tal fenómeno al alterar diversas variables. El experimentar teóricamente de esta manera se le conoce como simular.

Su importancia radica en que “la simulación podría contribuir al desarrollo de modelos adecuados para razonar y comprender en física, que sustenten la generación de relaciones pertinentes y permitan dotar de significado las expresiones matemáticas que se emplean para describir el comportamiento de un sistema físico” (Santos, Otero, Fanaro, 2000).

En este sentido, el objetivo general de este trabajo es aplicar la herramienta de las simulaciones como estrategia metodológica en el proceso de proponer un modelo de medición de la condición de estado del Nexo Agua-Energía-Alimentos ante efectos del cambio climático en escenarios plausibles con el fin de plantear e incorporar acciones de gestión sostenible de los recursos naturales en el área de estudio.

## 2.3. Optimización

La optimización se refiere al análisis de varias opciones para llevar a cabo una tarea y elegir la que genera los mejores resultados con base a los parámetros preestablecidos. No todo el tiempo se genera el mismo escenario óptimo, regularmente depende de los objetivos establecidos a optimizar. La optimización permite tener otro indicador para la toma de decisiones, ya que busca definir la mejor opción.

Resolver un problema de optimización consiste en encontrar el valor que deben tomar las variables para hacer óptima la función objetivo satisfaciendo el conjunto de restricciones. Los métodos de optimización son clasificados regularmente en: métodos clásicos y métodos metaheurísticos. Dentro de los primeros se encuentra la optimización lineal, lineal entera mixta, no lineal, estocástica, dinámica, etc., y en el segundo grupo se incluyen los algoritmos evolutivos (genéticos entre otros), el método

del recocido simulado (simulated annealing), las búsquedas heurísticas o los sistemas multiagente (Begoña, Linares, & Ramos, 2010).

#### 2.4. Optimización multiobjetivo

En la búsqueda de estrategias que soporten la optimización simultánea de más de un criterio surge la optimización multiobjetivo. La optimización multiobjetivo corresponde a un problema de optimización donde intervienen simultáneamente varios objetivos, dado que se tiene más de una función que optimizar, se suelen generar escenarios donde si se minimiza o maximiza una función, otra función se ve afectada. Por tal razón, es necesaria la definición de escenarios que permitan una situación aceptable para todas las funciones que se involucren. Encontrar este tipo de balance no es tarea sencilla, existen casos donde llegar a tal escenario no es conveniente, por lo que dependerá de tomadores de decisiones el omitir alguna función objetivo determinada.

El principal reto en este tipo de optimización es el tratamiento de varias funciones objetivo a la vez, teniendo en cuenta que el óptimo para un objetivo no lo es para otro, siendo objetivos en conflicto entre sí.

Al programar de manera multiobjetivo, se busca optimizar de acuerdo con múltiples funciones objetivo sobre un conjunto de soluciones factibles, siendo parte de la programación matemática (Ehrgott & Wiecek, 2005).

#### 2.5. Desarrollo sustentable

El desarrollo sustentable se define como la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (WCED, 1987). De este artículo (WCED, 1987) se derivaron cuatro lineamientos: Proteger a largo plazo la sustentabilidad ecológica, satisfacer las necesidades humanas básicas y la fomentación de equidad intergeneracional e intergeneracional. En adición a éstos, Høyer (Høyer, 2000) presentó unos lineamientos secundarios que incluyen: Preservar el valor intrínseco de la naturaleza, fomentar la protección del medio ambiente, impulsar la participación pública y satisfacer las aspiraciones para tener una mejor calidad de vida (Holden, Linnerud, & Banister, 2014).

En el informe Brundtland 'Nuestro futuro común', se formalizó el concepto de desarrollo sustentable como el que satisfacía las necesidades del presente, sin

comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades (CMMAD, 1987). En 1992, en Río de Janeiro, se celebró la conferencia de la ONU sobre Medio Ambiente y Desarrollo; en 2002 se celebró en Johannesburgo, la Conferencia Mundial sobre Desarrollo Sustentable, donde su propósito fue impulsar acciones que permitieran que en el siglo XXI se alcanzara el desarrollo sostenible (Wolfensberger, 2005); se instituyó una “Década de la educación para un futuro sustentable (2005-2014)” (Pérez, Vilches, Grimaldi y Álvarez, 2006).

## 2.6. Energías renovables

La energía renovable tiene el potencial para hacer frente a los retos del desarrollo sustentable y para sobrellevar los desafíos clave en la relación energía-agua-alimentos. Específicamente entre la energía y la agricultura, la energía presenta un papel importante en la intensificación sostenible de la producción agrícola donde se busca que la adopción de prácticas agrícolas produzca más cultivos con menos energía. En las últimas décadas se han adquirido conocimientos sobre la adopción de tecnologías de energía renovable para reducir las pérdidas de alimentos postcosecha donde se pueden aumentar los ingresos (y diversidad) de los pequeños agricultores y la eficiencia en el uso de recursos. A su vez, ampliar los sistemas de energía renovable descentralizados en pequeña escala en las explotaciones agrícolas y las zonas rurales mejoran el acceso a los servicios modernos de energía y promueven la producción alimentaria y energética integrada.

## 2.7. Programación matemática

La programación matemática ha mostrado ser una herramienta muy eficiente en la solución de problemas de optimización, por su gran versatilidad para modelar problemas asociados con la optimización, y porque en la actualidad, gracias a los grandes avances teóricos en el área y los impresionantes logros electrónicos, los ordenadores modernos son capaces de dar soluciones muy precisas en tiempos razonables (Belotti y col., 2013).

Dentro del campo general de programación matemática existen diferentes modelos de optimización:

- Problema Lineal: los problemas de programación lineal exigen que tanto las expresiones de las restricciones como de los objetivos se expresen de

forma lineal, así como también que las variables deben ser números reales o continuas.

- Problema no Lineal: cuando alguna de las restricciones o la función objetivo no es lineal se tiene un problema no lineal, las variables de estos problemas, al igual que los lineales deben ser variables continuas.
- Problema Mixto Entero Lineal: tanto las restricciones, como la función objetivo deben ser lineales, y existen tanto variables continuas como discretas en estos problemas.
- Problema Mixto Entero no Lineal: cuando alguna de las restricciones o la función objetivo no es lineal, pero a diferencia del problema no lineal, en este caso existen variables discretas además de las continuas.

## 2.8. Flujo entre agua-energía-alimentos

En el contexto del nexo agua-energía-alimentos existen las interrelaciones y flujos entre estos tres sectores críticos. Su funcionalidad es analizar las tecnologías y estrategias disponibles para optimizar el uso de recursos y asegurar la sostenibilidad (WEF Nexus, 2018). Estas interrelaciones y flujos incluyen todos los componentes y conexiones necesarias para gestionar eficientemente el agua, la energía y los alimentos de manera integrada, considerando las sinergias y los compromisos entre ellos. Deben incluirse todas las tecnologías que el modelo matemático seleccione para la solución de la problemática multiobjetivo. Para este caso en el sector hídrico se consideran fuentes superficiales (presas) e instalaciones que procesan el agua para purificarla o tratarla antes de su uso o reutilización (plantas tratadoras de agua) para satisfacer las demandas domésticas, industriales, agrícolas y públicas. Para el sector energético se considera el uso de centrales eléctricas, parques solares y eólicos para satisfacer las demandas domésticas, industriales, comerciales, agrícolas y de alumbrado público. Para el sector alimentario se toman en consideración ciertos parámetros referentes a alimentos.

## 2.9. Índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos

Se pueden utilizar diferentes marcos y herramientas para analizar y cuantificar las interconexiones del nexo, para este caso es importante comprender información sobre el estado de la seguridad energética, alimentaria, hídrica y ambiental del momento, y la disponibilidad de recursos naturales; así como las relaciones existentes dentro de la región.

Como forma de evaluar la aplicación del nexo, Mahlknecht et al., proponen un diagrama compuesto denominado nonágono del nexo agua-energía-alimentos que considera tres indicadores clave (disponibilidad, acceso y sostenibilidad) por cada sector (agua, energía y alimentos). Los nueve parámetros constituyen el índice de seguridad de los sectores y se presentan visualmente en un gráfico radial como un nonágono. Todos los parámetros se presentan como un porcentaje donde el 100% representa el mejor rendimiento posible del parámetro respectivo, y el promedio de todos los parámetros compone el índice. En consecuencia, un índice cercano a 1 (100%) debería ser la meta aspiracional de un país.

El índice para la evaluación de seguridad hídrica, energética y alimentaria en Baja California es dado bajo el rango teórico de 0 a 1, donde 0 representa el nivel de seguridad más bajo para el recurso evaluado y 1 el nivel más alto. Cada recurso se evalúa de acuerdo con el análisis cuantitativo del nexo, donde las principales dimensiones de seguridad que se abordarán de manera cuantitativa son tres: disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad. Es así como, hablando de los componentes físicos del Nexo (agua, energía y alimentos), se entiende que la disponibilidad es la cantidad física destinada para usos y/o consumos de sectores específicos, la accesibilidad como la cantidad al cual logran acceder los usuarios, y la sostenibilidad como el desarrollo físico que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, que también nos ayuda a determinar si se tiene una sostenibilidad débil o fuerte ante la utilización de los recursos. De manera complementaria se pueden agregar dimensiones ambientales (como la minimización de emisiones de CO<sub>2</sub>), económicas (como la minimización de costos de proyectos de energías renovables propuestos), y sociales (como la maximización de la generación energética). Para la evaluación de seguridad en los recursos, cada uno de ellos se evalúa bajo las dimensiones: disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad, conformando un total de 9 parámetros de seguridad.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

Se realizó una revisión sistemática de la literatura donde se clasificaron 12 modelos matemáticos de acuerdo con un enfoque de investigación de optimización a partir de sus características, parámetros, restricciones, funciones objetivo y métodos de solución utilizados. De acuerdo con las características de desarrollo del modelo matemático en Baja California se ha escogido la programación lineal (LP, por sus siglas en inglés) como herramienta para optimizar el uso de recursos limitados en el nexo agua-energía-alimentos, proporcionando soluciones eficientes y sostenibles para la gestión de estos recursos interrelacionados.

La programación lineal permite modelar y resolver problemas complejos donde los recursos como agua, energía y alimentos deben ser distribuidos eficientemente. En el contexto del nexo, este enfoque facilitó la identificación de las mejores estrategias para abarcar estos recursos, minimizando costos y el impacto ambiental. Según un estudio en Nepal, la programación lineal aplicada en un modelo de optimización multiobjetivo puede ayudar a equilibrar múltiples objetivos, como la reducción del déficit energético, el mantenimiento del agua para riego, la reducción del riesgo de inundaciones y la maximización de las exportaciones de energía, integrando así las necesidades de diferentes sectores de manera holística (Dhaubanjari et al., 2017).

El enfoque del nexo requiere la comprensión de cómo las acciones en un sector afectan a los demás. La programación lineal permite analizar estos efectos cruzados y encontrar soluciones que optimicen el uso conjunto de los recursos de acuerdo con el objetivo u objetivos que se tengan. Estudios recientes han demostrado que la aplicación de métodos de programación lineal en el análisis del nexo agua-energía-alimentos puede mejorar significativamente la toma de decisiones, ayudando a los responsables políticos y planificadores a visualizar las interacciones y compromisos entre diferentes objetivos sectoriales (Correa-Porcel et al., 2021).

En este caso, el desarrollo de un modelo matemático del nexo agua-energía-alimentos llegó a ser un problema de programación lineal (LP) puesto que se

implementó una estrategia de inicialización por cada uno de los sectores, donde primero se utilizó una reformulación lineal, luego se resolvió el modelo de optimización considerando por separado los objetivos individuales, y finalmente se implementó el enfoque multiobjetivo. Se entiende también que el análisis del nexo puede no tener un comportamiento completamente lineal, siendo el valor de la población total; el número de usuarios del servicio energético; el número de usuarios del servicio hídrico; el número de personas con acceso a una alimentación saludable; y el número de tecnologías de energías renovables propuestas por sector como las variables discretas, mientras que la capacidad de extracción y consumo de las plantas del sector hídrico; la energía generada y consumida por sector; los costos de operación y mantenimiento para las tecnologías propuestas en el sector energético; las emisiones de gases de efecto invernadero generadas; y la magnitud de alimentos producidos y consumidos en la zona de estudio son variables continuas. Se han tomado en consideración métodos de descarte cuantitativos para identificar y eliminar opciones o soluciones subóptimas en el conjunto de decisiones. Estos métodos se aplican comúnmente en procesos de optimización y toma de decisiones para reducir la cantidad de alternativas.

Con motivo de mostrar fiabilidad al modelo de optimización en programación lineal (LP) multiobjetivo propuesto y a los resultados obtenidos en este trabajo, se plantea el desarrollo del enfoque nexo agua-energía-alimentos a la entidad federativa de Baja California, destacando dos municipios con base en sus problemáticas geográficas: Tijuana al ser el más vulnerable ante la crisis hídrica debido a sus escasos recursos hídricos propios, y Playas de Rosarito al ser el más vulnerable ante el cambio climático; este último es señalado debido a que se encuentra en el segundo nivel nacional de vulnerabilidad ante el cambio climático de acuerdo con el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (INECC; SEMARNAT). Playas de Rosarito se considera vulnerable principalmente en asentamientos humanos a deslaves, de tal modo que se encuentra entre los 273 municipios a priorizar en México ante el cambio climático y significando una exposición a riesgos de pérdida de recursos en el municipio.

Se parte desde la consideración del agua extraída mediante fuentes superficiales (presas), continuando por plantas de tratamiento de aguas residuales para cubrir las necesidades domésticas, agrícolas e industriales de la entidad

federativa. En el sector energético se toma en cuenta el uso de centrales eléctricas existentes y la propuesta del uso de fuentes renovables (solar, eólico y geotermia) para satisfacer la demanda energética. Por último, en el sector alimentario se utiliza información del Panorama Agroalimentario (AGRICULTURA) e información de fuentes gubernamentales globales como la FAO.

En ese mismo contexto, se ha analizado la seguridad que brinde el nexo agua-energía-alimentos por medio de un esquema de índice compuesto que permitió caracterizar el estado actual de agua, energía y alimentos en la entidad federativa, y en sentido de optimización, realizar una proyección orientada hacia los sectores del nexo que requieran ser priorizados de acuerdo con la población y desarrollo económico en crecimiento, además de proponer el uso de tecnologías de energía renovable.

Los parámetros necesarios para fundamentar el código matemático son obtenidos de páginas gubernamentales oficiales tales como Comisión Estatal del Agua (CONAGUA), Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEABC), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA), Secretaría de Energía de México (SENER), Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Su funcionalidad principal es comprender las necesidades requeridas para satisfacer las demandas de servicios a la población y la situación más actualizada de los recursos del caso de estudio. De esta forma se llena la información precisa para determinar la seguridad de los recursos mediante los índices en cuanto a su disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad.

### 3.1. Caso de estudio: Baja California

#### 3.1.1. Criterios de exclusión

Baja California tiene una extensión de 71,450 km<sup>2</sup>, lo que representa el 3.6% de la superficie del país. Sus coordenadas geográficas extremas son: al norte 32°43'07", al sur 28°00'00" de latitud norte; al este 112°17'48", y al oeste 118°21'54" de longitud oeste. La entidad federativa cuenta con un total de 3,769,020 habitantes a lo largo de sus 7 municipios: Mexicali, Ensenada, Tijuana, Tecate, Playas de

Rosarito, San Quintín y San Felipe, según el último censo disponible realizado por el INEGI (2020). Sin embargo, debido a la limitada disponibilidad de datos abiertos y el alcance propuesto de la búsqueda, hay límites que se aplican al presente estudio donde se indica que dos municipios (San Quintín y San Felipe) no serán investigados. De esta manera nace el Área de Estudio de Baja California (AEBC) donde los municipios restantes son objeto de análisis. Se resalta que tal condición no debe alterar resultados relevantes de la revisión, siendo elegible para el estudio.

### 3.1.2. Descripción General y Análisis Climatológico del área de estudio

El AEBC cuenta con un total de 3,651,452 habitantes siendo el 96.88% de la población total de la entidad federativa de Baja California. Esta zona está constituida por 5 municipios: Mexicali, Ensenada, Tijuana, Tecate y Playas de Rosarito. Cuenta con una aportación al PIB Nacional en 2020 del 3.7% y el sector de actividad que más aporta al PIB Estatal es el comercio. Es una región ubicada en el noroeste de México donde predomina el clima muy seco y el seco templado (presentando riesgos de fenómenos extremos asociados al clima como olas de calor, sequías, inundaciones, entre otros), aunque en menor medida también se encuentra el subtipo de clima templado semifrío subhúmedo en algunas localidades de Ensenada (INEGI, 2020). En la zona, aproximadamente el 69% del área de estudio es de clima muy seco extremo y el 24% es seco templado debido a su ubicación geográfica en la parte noroeste del país (INEGI, 2020).

La temperatura media anual es de 18 a 19°C. Agosto es el mes más cálido con una temperatura máxima promedio de 34.0°C; mientras que los meses más fríos son diciembre y enero con una temperatura mínima de 5.8°C y 5.7°C, respectivamente. Las temperaturas más altas son mayores de 30°C y se presentan en los meses de mayo a septiembre y la más baja, que es alrededor de 5°C, en el mes de enero. En la ciudad de Mexicali se han registrado temperaturas máximas extremas de hasta 45°C entre los meses de julio y agosto.

Las lluvias son muy escasas, alrededor de 200 mm de precipitación total anual. El municipio de Mexicali tiene uno de los registros de precipitación total anual más baja de todo el país, pues es menor a los 50mm. La distribución mensual de la precipitación en el Estado acentúa los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso, debido a que el 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre los

meses de junio y septiembre. En 2020, la I Península de Baja California, presentó mínimos niveles de precipitación (103.3 mm/año) a comparación de su Precipitación pluvial normal de 1981-2010 que fue de 168.1 mm/año (CONAGUA, 2021). Debido a la escasa precipitación, la actividad agrícola es afectada en los cultivos, la alfalfa, el algodón hueso y el arándano son los principales cultivos afectados por su alta demanda de agua, y su alta producción y exportación en la entidad federativa. Es de esta manera en que el clima es una gran limitación para el sector agrícola al dañar directamente la disponibilidad de alimentos para satisfacer las necesidades de la población y posiblemente creando una dependencia creciente en alimentos importados.

### 3.1.3. Flujos entre agua-energía-alimentos del problema planteado

#### Sector hídrico

El presente análisis incluye 5 presas: Abelardo L. Rodríguez, El Carrizo, Emilio López Zamora, Derivadora Morelos y Las Auras, con capacidad del vertedor de 4 200 m<sup>3</sup>/s, 86 m<sup>3</sup>/s, 121 m<sup>3</sup>/s, 9 900 m<sup>3</sup>/s y 1.14 m<sup>3</sup>/s, respectivamente; distribuidos por los municipios de Mexicali, Ensenada, Tecate y Tijuana. Hay 44 plantas municipales de tratamiento de aguas residuales en operación. Las plantas de tratamiento con mayor capacidad se encuentran 2 en Tijuana (PITAR y San Antonio de los Buenos, ambas con capacidad instalada de 1 100 l/s) y 2 en Mexicali (Zaragoza y Las Arenitas, con capacidad instalada de 1 300 y 840 l/s, respectivamente). Por lo que, para el presente estudio se analiza un total de 4 plantas de tratamiento de aguas residuales.

#### Sector energético

El sector energético de Baja California se divide en dos partes principales: energía renovable y energía proveniente de combustibles fósiles. La energía renovable en Baja California se compone de tres secciones: energía solar, energía eólica y energía geotérmica. De acuerdo con el PRODESEN (2023) realizado por la SENER, la energía solar en Baja California incluye el parque solar "La Rumorosa Solar" con una generación neta estimada de 123 GWh. Según el mismo documento, la energía eólica en Baja California tiene una generación estimada promedio anual total de 52 GWh en 2022. Este sector incluye la generación estimada promedio anual de Fuerza Eólica San Matías, ubicada en Ensenada, con una capacidad instalada de 30 MW y una generación de aproximadamente 24 GWh. También se incluye el

Parque Eólico Rumorosa I, ubicado en Tecate, con una capacidad instalada de 10 MW y una generación de aproximadamente 28 GWh. Finalmente, se toma en consideración la energía geotérmica con una capacidad instalada de 570 MW, destacando su importancia dentro de la energía renovable del Estado.

La segunda parte del sector energético está compuesta por centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles y no son renovables. Se consideraron únicamente las centrales eléctricas de generación, excluyendo las de autoabastecimiento y exportadoras. Empezando por 5 Centrales Eléctricas de Ciclo Combinado: EAX-Gen con generación estimada promedio anual de 361.35 GWh, Baja California III con 262.8 GWh, CC Presidente Juárez (Rosarito III): con 5,406.64 GWh, La Rosita con 2,338.92 GWh y CC Mexicali (Gen) con 1,729.05 GWh. Se consideró la generación estimada de la central termoeléctrica CT Rosarito II (2 unidades), también conocida como CT Presidente Juárez, con una generación estimada de 903 GWh. Finalmente, se tomaron en consideración 9 Centrales Eléctricas de Turbina de Gas: Central Turbogás González Ortega (439.32 GWh), CTG Baja California II Fase I (3 unidades) con 206.65 GWh, CTG Tijuana (unidad 3) con 261.75 GWh, CTG Tijuana (unidad 1 y 2) con 91.84 GWh, Fábrica de Papel San Francisco (178.83 GWh), TG Mexicali (6 unidades) con 144.2 GWh, Energía Solar Cachanilla con 117.12 GWh, Energía Costa Azul con 40.5 GWh y CTG Mexicali con 1.7 GWh.

El análisis del sector energético en Baja California es crucial para la optimización del uso de los recursos energéticos disponibles. Este estudio permite identificar áreas de mejora en la eficiencia energética, maximizar el uso de fuentes renovables y reducir la dependencia de combustibles fósiles, contribuyendo así a la sostenibilidad y resiliencia del sistema energético del estado.

### Sector alimentario

Para el sector alimentario se tomaron en consideración los principales alimentos producidos en Baja California de acuerdo con el Programa Agroalimentario del SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, ONUAA, o más conocida como FAO. Ambas plataformas han servido como iniciativas que generan información detallada y actualizada sobre la producción agrícola, pecuaria y pesquera de la entidad federativa y el país, respectivamente.

Dentro del GAMS, se proponen estaciones donde todos los recursos son concentrados para su posterior distribución al sector donde se requieran, así hay: estación doméstica, agrícola, industrial, comercial y de alumbrado público.

### 3.1.4. Nomenclatura

#### 3.1.4.1 Subíndices

##### Conjuntos

Tabla 1. Nomenclaturas

<i>c</i>	Conjunto para cada municipio (c1 = Mexicali, c2 = Tijuana, c3 = Ensenada, c4 = Playas de Rosarito, c5 = Tecate)
<i>t</i>	Conjunto referente al tiempo (Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre, Diciembre)
<i>g</i>	Plantas tratadoras de agua – PITAR(Tijuana), San Antonio de los Buenos (Tijuana), Zaragoza (Mexicali), Las Arenitas (Mexicali)
<i>d</i>	Conjunto de presas de agua existentes - Abelardo L. Rodríguez (Tijuana), El Carrizo (Tijuana), Emilio López Zamora (Ensenada), Derivadora Morelos (Mexicali), Las Auras (Tecate)
<i>sp</i>	Parque solar – La Rumorosa Solar (Mexicali)
<i>ag</i>	Parques eólicos – Fuerza Eólica San Matías (Ensenada), Parque Eólico La Rumorosa I (Tecate)
<i>geo</i>	Planta geotérmica - Cerro Prieto (Mexicali)
<i>pp</i>	Centrales Eléctricas - EAX-Gen, Baja California III, CC Presidente Juárez (Rosarito III), La Rosita, CC Mexicali (Gen), CT Rosarito II (2 unidades), Central Turbogás González Ortega, CTG Baja California II Fase I (3 unidades), CTG Tijuana (unidad 3), CTG Tijuana (unidad 1 y 2), Fábrica de Papel San Francisco, TG Mexicali (6 unidades), Energía Solar Cachanilla, Energía Costa Azul y CTG Mexicali

### 3.2. Metodología del índice de seguridad del nexo agua-energía-alimentos

Para el agua, la energía y los alimentos, los índices se calculan según las ecuaciones 1 a 9 para representar las deficiencias en cada sector (Mahlknecht et al., 2019).

La disponibilidad de agua (*W-1*) mide la producción o generación de agua en comparación con el agua consumida en la región, el valor obtenido es un índice total de disponibilidad de agua para uso. En este sentido, la huella hídrica total es la cantidad de recursos hídricos empleados en la creación de los bienes y servicios

consumidos por la población. Es importante notar que este índice representa la disponibilidad del agua, es decir qué tanto recurso hídrico hay disponible en ese momento, por lo que un valor cercano al 1 representa una menor huella hídrica.

$$W - 1 = \frac{\textit{TotalWaterGenerated} - \textit{TotalWaterFootprint}}{\textit{TotalWaterGenerated}} \quad (\text{ec. 1})$$

La accesibilidad al agua (W-2) considera la población que no tiene acceso al servicio en comparación con la población total, el resultado refleja el índice de totalidad de población con acceso al agua.

$$W - 2 = \frac{\textit{TotalPopulation} - \textit{TotalPopulationWithoutWaterAccess}}{\textit{TotalPopulation}} \quad (\text{ec. 2})$$

La sostenibilidad del agua (W-3) se evalúa a través del consumo total de agua (huella hídrica) menos el agua importada necesaria para satisfacer las demandas, el resultado refleja el índice de totalidad de agua consumida de fuentes internas en relación con la cantidad total de agua consumida dentro de la zona de estudio.

$$W - 3 = \frac{\textit{TotalWaterFootprint} - \textit{ImportedWater}}{\textit{TotalWaterFootprint}} \quad (\text{ec. 3})$$

La disponibilidad de la energía (E-1) es la diferencia entre la capacidad energética total y la huella energética en relación con la capacidad energética total, el resultado refleja el índice de totalidad de energía disponible para su uso.

$$E - 1 = \frac{\textit{TotalEnergyGenerated} - \textit{TotalEnergyFootprint}}{\textit{TotalEnergyGenerated}} \quad (\text{ec. 4})$$

La accesibilidad a la energía (E-2) se evalúa considerando la población que no tiene acceso a la energía eléctrica en relación con la población total, el resultado refleja el índice de totalidad de población con acceso a la energía.

$$E - 2 = \frac{\textit{TotalPopulation} - \textit{TotalPopulationWithoutEnergyAccess}}{\textit{TotalPopulation}} \quad (\text{ec. 5})$$

La sostenibilidad de la energía (E-3) se evalúa a través de la energía producida con fuentes no renovables en comparación con la huella energética total, dando como resultado la representación de fuentes renovables en la huella energética.

$$E - 3 = \frac{\textit{TotalEnergyFootprint} - \textit{EnergyFromNonRenewables}}{\textit{EnergyFromNonRenewables}} \quad (\text{ec. 6})$$

La disponibilidad de los alimentos (F-1) tiene un procedimiento ligeramente diferente, es la evaluación entre la cantidad de energía promedio necesaria para que una persona esté sana y la cantidad de energía consumida a través de la dieta, el resultado refleja el índice de totalidad de alimentos disponible para su uso. Esta información fue localizada a través de la FAO.

$$F - 1 = \frac{\textit{ADEnergyRequired} - \textit{ADEnergyConsumed}}{\textit{ADEnergyRequired}} \quad (\text{ec. 7})$$

La accesibilidad alimentaria (F-2) considera la población total y la población desnutrida, el resultado refleja el índice de totalidad de población sin carencia alimentaria.

$$F - 2 = \frac{\textit{TotalPopulation} - \textit{UndernourishedPopulation}}{\textit{TotalPopulation}} \quad (\text{ec. 8})$$

La sostenibilidad de los alimentos (F-3) se evalúa a través de la producción total de alimentos menos los alimentos importados necesarios para satisfacer la demanda de la población, el resultado refleja el índice de totalidad de alimentos consumidos obtenidos de fuentes internas en relación con la cantidad total de alimentos consumidos de fuentes externas. Para el caso de Baja California, la producción alimentaria incluye los productos agrícolas, pecuarios y pesqueros más relevantes.

$$F - 3 = \frac{\textit{TotalFoodGenerated} - \textit{ImportedFood}}{\textit{TotalFoodGenerated}} \quad (\text{ec. 9})$$

Los datos para resolver los índices de seguridad en alimentos se encuentran a continuación en la Tabla 1, con datos extraídos de la FAO (2022).

Tabla 2. Parámetros referentes a los alimentos (FAO, 2022).

<b>Año</b>	<b>2022</b>	
<b>Categoría</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Disponibilidad de Alimentos</b>		
Energía Dietética Promedio Requerida	1,856	kcal/día
Energía Dietética Promedio Consumida	2,403	kcal/día
<b>Accesibilidad Alimentaria</b>		
Población	3,651,452	personas
Población Desnutrida	453,630	personas
<b>Sustentabilidad en Alimentos</b>		
<b>Cantidad Total de Alimentos Producidos</b>		
Alfalfa Verde	2,995,749	Ton/año
Algodón Hueso	62,311	Ton/año
Arándano	4,814	Ton/año
Avena grano	2,922	Ton/año
Brócoli	14,268	Ton/año
Cebolla	100,197	Ton/año
Coliflor	2,941	Ton/año
Esparrago	30,495	Ton/año
Frambuesa	16,089	Ton/año
Fresa	91,628	Ton/año
Lechuga	31,703	Ton/año
Nopalitos	12,974	Ton/año
Pepino	47,299	Ton/año
Sorgo forrajero	148,120	Ton/año
Trigo grano	313,529	Ton/año
Uva fruta	5,367	Ton/año
Uva industrial	24,748	Ton/año
Uva pasa	342	Ton/año
Zarzamora	873	Ton/año
Carne en canal bovino	111,882	Ton/año
Atún	8,650	Ton/año
Camarón	1,764	Ton/año
Langosta	586	Ton/año

Pulpo	204	Ton/año
Sardina	123,698	Ton/año
<b>Cantidad Total de Alimentos Importados</b>		
Alfalfa Verde	5.39	Ton/año
Algodón Hueso	3,592.89	Ton/año
Arándano	3,082.52	Ton/año
Avena grano	2.98	Ton/año
Brócoli	436.39	Ton/año
Cebolla	12,189.12	Ton/año
Coliflor	143.43	Ton/año
Esparrago	62.93	Ton/año
Frambuesa	10.13	Ton/año
Fresa	5,632.47	Ton/año
Lechuga	2,138.32	Ton/año
Nopalitos	0.00	Ton/año
Pepino	9.01	Ton/año
Sorgo forrajero	0.00	Ton/año
Trigo grano	533,250.30	Ton/año
Uva fruta	1,379.73	Ton/año
Uva industrial	38.76	Ton/año
Uva pasa	390.54	Ton/año
Zarzamora	11.33	Ton/año
Carne en canal de bovino	6,421.95	Ton/año
Atún	25,819.38	Ton/año
Camarón	199.34	Ton/año
Langosta	10.03	Ton/año
Pulpo	43.26	Ton/año
Sardina	1,398.84	Ton/año

La relación conceptual entre los diferentes sectores se desarrolló a partir de la teoría del nexo, la cual enfatiza las interdependencias y conexiones entre los recursos de agua, energía y alimentos. Esta interrelación se ha determinado conceptualmente a partir del análisis exhaustivo de los datos disponibles. Los recursos conectados están altamente interrelacionados, y estas interrelaciones se han considerado gracias al uso de datos previamente reportados de diversas fuentes

fiables. Por ejemplo, el agua y la energía necesarias para la agricultura dependen significativamente del tipo de agricultura practicada, del cultivo específico, de las características del suelo, entre otros factores. Además, el consumo de agua para la producción de electricidad varía según la tecnología utilizada. Por ejemplo, las plantas termoeléctricas requieren grandes volúmenes de agua para la refrigeración, mientras que las tecnologías más modernas y eficientes pueden reducir este consumo. Para otros combustibles, el consumo de agua depende del tipo de combustible, la fuente de origen y la tecnología empleada en su producción y refinación.

Los resultados de este análisis se presentan visualmente en un diagrama de radar, el cual permite mostrar la vulnerabilidad de estos recursos en una región específica durante un periodo determinado. Esta representación gráfica facilita la identificación de los índices más débiles, permitiendo desglosarlos para comprender mejor los temas más críticos y evaluar diversas estrategias o acciones de mejora.

### 3.2.1. Modelo matemático

El modelo matemático propuesto para el nexo agua-energía-alimentos en Baja California está diseñado para describir y optimizar la selección y tamaño de diversas tecnologías necesarias para satisfacer las necesidades de estos recursos críticos. Este modelo incluye el uso de agua proveniente de fuentes superficiales, como presas y plantas de tratamiento. En términos de energía, el modelo favorece el uso de fuentes renovables, tales como la energía solar, eólica y geotérmica, además de incluir centrales eléctricas convencionales.

Cabe destacar que el objetivo principal del modelo no es predecir el funcionamiento específico de cada tecnología, sino optimizar su selección y dimensionamiento, teniendo en cuenta factores como la eficiencia, los costos asociados y su impacto ambiental. Este enfoque permitió identificar las combinaciones tecnológicas más adecuadas y sostenibles para la región, asegurando una gestión eficiente de los recursos naturales.

La Tabla 1 en el documento detalla los principales parámetros utilizados en este modelo matemático, proporcionando una base cuantitativa sólida para las

decisiones de optimización. Estos parámetros incluyen características técnicas y económicas de las tecnologías evaluadas.

Tabla 3. Principales Parámetros Utilizados Para el Estudio de Baja California

Parámetro	Valor	Unidades	Referencia
$\alpha^{BW}$	0.2	-	Al-Jayyousi, 2003
$\alpha^{GW}$	0.8	-	Al-Jayyousi, 2003
$\alpha^{BWT}$	0.85	-	Núñez-López et al., 2018
$\alpha^{GWT}$	0.93	-	Núñez-López et al., 2018
$\gamma_{p,p0=CO_2}^{Fuel}$	393.3	Millones ton/ GW-h	PRODESEN, 2018
$FCost^{AG}$	0.0023	Millones USD	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018
$FCost^{SP}$	0.003	Millones USD	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018
$UCOM^{AG}$	38.1	Millones USD/GW-h	PRODESEN, 2018
$UCOM^{PP}$	19	Millones USD/GW-h	PRODESEN, 2018
$UCOM^{SP}$	10.7	Millones USD/GW-h	PRODESEN, 2018
$UCOM^{TGW}$	5	Millones USD/Hm3	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018
$VCOST^{AG}$	0.05	Millones USD/Hm2	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018
$VCOST^{SP}$	0.2	Millones USD/Hm2	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018

El modelo matemático propuesto describe cada una de las tecnologías seleccionadas para satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos de una región determinada. Algunas tecnologías ya existen y otras se proponen para aprovechar los recursos disponibles.

## AGUA

### - Agua de Presas

El agua de presas se puede empezar a determinar como la cantidad de agua pluvial recolectada en cada presa en un periodo de tiempo ( $W_{c,t}^{AP-Dam}$ ). Esto es igual al producto entre el área de la presa ( $A_c^{Dam}$ ), y la precipitación en ese periodo ( $AP_{c,t}$ ), esto es tomando en cuenta todos los municipios (c) a lo largo del tiempo (t):

$$W_{c,t}^{RW-Dam} = A_c^{Dam} \cdot RW_{c,t} , \quad \forall c, \forall t \quad (ec. 10)$$

El balance total de agua almacenada en cada una de las presas para el tiempo uno ( $W_{c,t \leq 1}^{Dam}$ ) es igual a la cantidad de agua almacenada en el tiempo cero ( $W_{c,t=0}^{Dam}$ ) más la cantidad de agua captada por precipitaciones en la presa ( $W_{c,t \leq 1}^{RW-Dam}$ ), más el agua de alimentación en cada presa por recarga natural ( $NR_{c,t \leq 1}$ ), pero se le quita el agua retirada a través de vertedores hidráulicos ( $HW_{c,t \leq 1}$ ), menos la cantidad de agua evaporada ( $W_{c,t \leq 1}^{Evaporated}$ ) y menos la cantidad de agua filtrada ( $W_{c,t \leq 1}^{Filtrated}$ ), menos el agua destinada al uso doméstico ( $W_{x,c,t \leq 1}^{Dam-D}$ ), uso agrícola ( $W_{x,c,t \leq 1}^{Dam-A}$ ) y uso industrial ( $W_{x,c,t \leq 1}^{Dam-I}$ ).

$$W_{c,t \leq 1}^{Dam} = W_{c,t=0}^{Dam} + W_{c,t \leq 1}^{RW-Dam} + NR_{c,t \leq 1} - HW_{c,t \leq 1} - W_{c,t \leq 1}^{Evaporated} - W_{c,t \leq 1}^{Filtrated} \quad (ec. 11)$$

$$- \sum_c W_{c,t \leq 1}^{Dam-D} - \sum_c W_{c,t \leq 1}^{Dam-A} - \sum_c W_{c,t \leq 1}^{Dam-I} , \quad \forall c, \forall t \leq 1$$

Como no toda el agua almacenada en las presas puede ser extraída, se requiere una ecuación que restrinja el nivel mínimo y máximo de operación en cada presa. Esto es para restringir el modelo matemático y funcione de manera adecuada. Tal ecuación nos indica que el agua almacenada debe ser igual o mayor que la capacidad mínima e igual o menor que la capacidad máxima:

$$W_{c,t}^{Dam} \geq MinCapacity_c^{Dam} , \quad \forall c, \forall t \quad (ec. 12)$$

$$W_{c,t}^{Dam} \leq MaxCapacity_c^{Dam} , \quad \forall c, \forall t \quad (ec. 13)$$

El agua que es extraída por cada una de las presas se representa con la sumatoria del agua extraída para uso doméstico, uso agrícola y uso industrial:

$$TotalW^{Dam} = \sum_c \sum_t [W_{c,t}^{Dam-D} + W_{c,t}^{Dam-A} + W_{c,t}^{Dam-I}] \quad (ec. 14)$$

- Agua de Plantas de Tratamiento

El agua de las plantas de tratamiento se determina primero con el total de aguas grises generada, que es el producto de la multiplicación del factor de conversión de aguas grises por la capacidad máxima de cada planta de tratamiento de agua:

$$WGW_{c,t}^{TGW} = \alpha^{GW} \cdot CapTSW_{c,t}, \quad \forall c, \forall t \quad (ec. 15)$$

El total de aguas grises generada se multiplica ahora por el factor de conversión para planta tratadora de aguas grises y es el total de aguas grises tratada:

$$WTGW_{c,t}^{TGW} = \alpha^{GWT} \cdot WGW_{c,t}^{TGW}, \quad \forall c, \forall t \quad (ec. 16)$$

El total de aguas grises tratada se representa con la sumatoria del agua extraída para uso doméstico, uso agrícola y uso industrial:

$$WTGW_{c,t}^{TGW} = \sum_c \sum_t [WTGW_{c,t}^{TGW-D} + WTGW_{c,t}^{TGW-A} + WTGW_{c,t}^{TGW-I}] \quad (ec. 17)$$

El agua de las plantas de tratamiento se determina primero con el total de aguas negras generada, que es el producto de la multiplicación del factor de conversión de aguas negras por la capacidad máxima de cada planta de tratamiento de agua:

$$WBW_{c,t}^{TBW} = \alpha^{BW} \cdot CapTSW_{c,t}, \quad \forall c, \forall t \quad (ec. 18)$$

El total de aguas negras generada se multiplica ahora por el factor de conversión para planta tratadora de aguas negras y es el total de aguas negras tratada:

$$WTBW_{c,t}^{TBW} = \alpha^{BWT} \cdot WGW_{c,t}^{TBW}, \quad \forall c, \forall t \quad (\text{ec. 19})$$

El total de aguas negras tratada se representa con la sumatoria del agua extraída para uso doméstico, uso agrícola y uso industrial:

$$WTBW_{c,t}^{TBW} = \sum_c \sum_t [WTBW_{c,t}^{TBW-D} + WTBW_{c,t}^{TBW-A} + WTBW_{c,t}^{TBW-I}]$$

## ENERGÍA

- Centrales eléctricas

La energía generada en las centrales eléctricas ( $E_{p,t}^{pp}$ ) es igual a la eficiencia del combustible quemado ( $\eta_c^{Fuel}$ ) multiplicado por la cantidad de combustible ( $Fuel_{c,t}$ ) utilizado:

$$E_{c,t}^{pp} = \eta_c^{Fuel} \cdot Fuel_{c,t}, \quad \forall c, \forall t \quad (\text{ec. 21})$$

La energía total producida en las centrales eléctricas ( $\sum_c E_{c,t}^{pp}$ ) debe ser la suma de la energía generada en cada una de las centrales eléctricas existentes, y a su vez esta debe ser mayor que la energía enviada para satisfacer demandas para uso doméstico ( $E_{c,t}^{pp-D}$ ), uso industrial ( $E_{c,t}^{pp-I}$ ), uso agrícola ( $E_{c,t}^{pp-A}$ ), uso comercial ( $E_{c,t}^{pp-C}$ ) y alumbrado público ( $E_{c,t}^{pp-SL}$ ):

$$\sum_c E_{c,t}^{pp} \geq E_{c,t}^{pp-D} + E_{c,t}^{pp-I} + E_{c,t}^{pp-A} + E_{c,t}^{pp-SL} + E_{c,t}^{pp-C}, \quad \forall c, t \quad (\text{ec. 22})$$

De acuerdo con la información más actualizada (2022), Baja California tuvo una generación estimada promedio anual de 12,483.6675 Gwh a partir de 5 centrales de ciclo combinado, 1 termoeléctrica, y 9 de turbina de gas.

- Energía solar

La electricidad producida por paneles solares ( $E_{c,t}^{Solar}$ ) se consideró como el producto entre el área del panel solar ( $Área_c^{Solar}$ ), su eficiencia ( $\eta^{Solar}$ ), el factor de radiación solar ( $h_{c,t}$ ), el coeficiente de rendimiento ( $PR$ ), y el número de paneles solares. Para Baja California se tomó en cuenta el parque La Rumorosa Solar generando aprox. 122.68 GWh:

$$E_{c,t}^{Solar} = Area_c^{Solar} \cdot \eta^{Solar} \times h_{c,t} \cdot PR \cdot N_{SP}, \quad \forall c, \forall t \quad (ec. 23)$$

- Energía eólica

La electricidad producida por aerogeneradores ( $E_{c,t}^{WindTurbines}$ ) se basa en la metodología de distribución de Weibull y está en función de la velocidad del viento en el sitio ( $WindSpeed$ ), la densidad del aire ( $\rho^{air}$ ), el área del rotor del aerogenerador ( $Area^{rotor}$ ), y los límites inferior y superior de la velocidad.

- Energía geotérmica

Para la estimación de producción promedio anual de la energía geotérmica se tomó en cuenta la generación geotérmica ( $Geothermal_{c,t}^{Cap}$ ), el factor de planta de la central geotérmica ( $\alpha^{geo}$ ) y las horas de operación efectiva en un año ( $geo^{hrs}$ ).

- Energía producida por fuentes renovables

La energía total generada por medio de fuentes renovables ( $E_{c,t}^{Renewable}$ ), en cada municipio en un cierto periodo de tiempo, es la suma de la energía a través de paneles solares ( $E_{c,t}^{Solar}$ ), plantas geotérmicas ( $E_{c,t}^{Geothermal}$ ) y aerogeneradores ( $E_{c,t}^{Wind}$ ):

$$E_{c,t}^{Renewable} = E_{c,t}^{Solar} + E_{c,t}^{Geothermal} + E_{c,t}^{Wind}, \quad \forall c, \forall t \quad (ec. 24)$$

### 3.2.4. Enfoque de resolución multiobjetivo

Como se ha explicado anteriormente, el enfoque nexo agua-energía-alimentos permite abordar problemas complejos en los que estos tres recursos deben ser distribuidos de manera eficiente considerando su interrelación. Actualmente, estos recursos son gestionados de manera separada, lo que impide percibir las consecuencias de aplicar estrategias sin considerar el enfoque nexo. Cada sector tiene objetivos específicos, y la gestión ineficiente de estos recursos conduce a su desperdicio. Dado que no podemos permitirnos alejarnos del desarrollo sostenible, especialmente en áreas vulnerables al cambio climático como Baja California, este enfoque es fundamental.

En el presente proyecto, se minimizaron y maximizaron los objetivos de acuerdo con las metas establecidas, buscando aproximarnos al desarrollo sostenible mientras se busca gastar lo menos posible. En primer lugar, se buscó minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero (GGE\_pp\_CO2), considerando únicamente las emisiones generadas por las centrales eléctricas de ciclo combinado, termoeléctricas y de turbogás en Baja California. Las emisiones de gases de efecto invernadero a partir de fuentes de energía renovable fueron despreciadas. Además, minimizar las emisiones de GEI en Baja California implica la adquisición de sistemas de generación distribuida, lo que inevitablemente conlleva un costo. La metodología empleada en este proyecto adoptó un enfoque multiobjetivo, reconociendo que los objetivos pueden entrar en conflicto y que es necesario encontrar un equilibrio óptimo. Este equilibrio es conocido como optimización y busca una situación aceptable para todas las funciones involucradas cuando se tienen diferentes puntos de enfoque para la gestión integrada de recursos. Además de la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero, se consideró el bienestar económico de la población, por lo que se buscó minimizar los costos totales (TAC), que incluyen los costos de operación y mantenimiento de los sistemas existentes más la adquisición de otros sistemas. Este balance es crucial ya que no se puede invertir todo en una sola adquisición de energías renovables. Otro objetivo clave fue cubrir el 100% de la demanda del sector energético, por lo que se maximizó la generación de energía estimada (TotEG). La cobertura total de la demanda energética es esencial para el bienestar y desarrollo sostenible de la región.

El enfoque nexo es esencial para identificar y mitigar los impactos negativos que resultan de la gestión separada de los recursos agua, energía y alimentos. Al integrar estos sectores, es posible desarrollar estrategias que maximicen los beneficios mientras minimicen los costos y daños ambientales, promoviendo así un desarrollo sostenible y resiliente. El modelo de optimización desarrollado en este proyecto consideró las restricciones y objetivos específicos relacionados con el agua, la energía y la producción de alimentos, buscando soluciones óptimas para maximizar o minimizar las variables planteadas. Este enfoque permite una gestión más eficiente y sostenible de los recursos, contribuyendo al bienestar de la población y al desarrollo sostenible de Baja California.

Ahora, al maximizar y minimizar cada uno de los objetivos (TotEG, TAC, GGE\_pp\_CO2) puede que exista el punto utópico con los menores valores obtenidos de cada objetivo. Sin embargo, es muy importante reconocer que el punto utópico no puede ocurrir ya que los objetivos se contraponen por querer ser satisfechos y afectando directamente la optimización de los índices de seguridad. Es por esto por lo que el enfoque multiobjetivo propuesto para solucionar el modelo matemático LP es la programación por metas (goal programming) secuencial lineal, que consta en crear tres nuevas funciones objetivo (una por cada objetivo) que involucre considerar las prioridades y límites que se tiene, así como agregar variables desviacionales.

El primer objetivo es maximizar la generación estimada promedio anual de energía en Baja California, se indica que debe ser mayor a la demanda para buscar satisfacer el 100% de la demanda energética. Después se minimizan los costos de capital debido a que esos son los que están asociados por cada unidad propuesta. Finalmente, se deben minimizar los GEI para que sean menores a la magnitud de GEI estimados.

En cuestión de las variables desviacionales, existen dos: la variable de desviación negativa ( $d^-$ ) y la variable de desviación positiva ( $d^+$ ). Se denomina variable de desviación negativa a la variable que mide la diferencia que falta para que la meta alcance el nivel de aspiración, por ello cuando queremos maximizar un objetivo esta debe crecer, mientras que  $d^+$  debe ser cero. Para maximizar la

generación energética  $d^-$  debe crecer y  $d^+$  disminuir. Por otro lado, se denomina variable de desviación positiva a la variable que mide el exceso que hay desde el nivel de aspiración y la meta, por lo que, cuando queramos minimizar una función objetivo,  $d^+$  debe ser la que crezca y conviene que  $d^-$  disminuya.

Cuando se agregan estas variables a las funciones objetivo son consideradas variables de “stack” (aquellas que en optimización convierten desigualdades en igualdades). Al agregar  $d^+$  y  $d^-$  al lado izquierdo de la ecuación, hacemos que las desigualdades sean igualdades y nos permite resolver la optimización. Es importante destacar que ambas variables desviacionales no pueden ser positivas simultáneamente, por lo que si una tiene un valor la otra debe ser cero. Finalmente, solo se debe determinar cual de ambas variables se tiene que minimizar de acuerdo con los objetivos que se busquen lograr. La aplicación del enfoque se explica a detalle en la sección de resultados.

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. Resultados de los índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos

Para analizar la seguridad del nexo agua-energía-alimentos en Baja California se desarrolló un gráfico radial con marcadores que representan los 9 índices para el último año de datos disponibles (2022) (Figura 4.1) que muestra la evaluación de los índices presentados en las ecuaciones 1 a 9.

El gráfico muestra un único valor de cero con respecto a la disponibilidad de alimentos (F-1) debido que la población mantuvo un consumo de alimentos superior a lo requerido, mientras que la accesibilidad (F-2) y la sostenibilidad de alimentos (F-3) están cerca de 0.9. De manera similar, la disponibilidad de energía (E-1) se encuentra en un nivel bajo debido al déficit de balance energético en la entidad federativa y la baja generación de energía local a comparación del consumo; la accesibilidad energética (E-2) es muy alta siendo cercana a 1 y la sustentabilidad energética (E-3) es únicamente buena al tener una moderada participación de fuentes renovables en la combinación de fuentes de energía.

Finalmente, la disponibilidad (W-1) y acceso (W-2) al agua mantuvieron índices altos mientras que la sostenibilidad hídrica (W-3) refleja la dependencia al agua importada para satisfacer las demandas.

NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, 2022

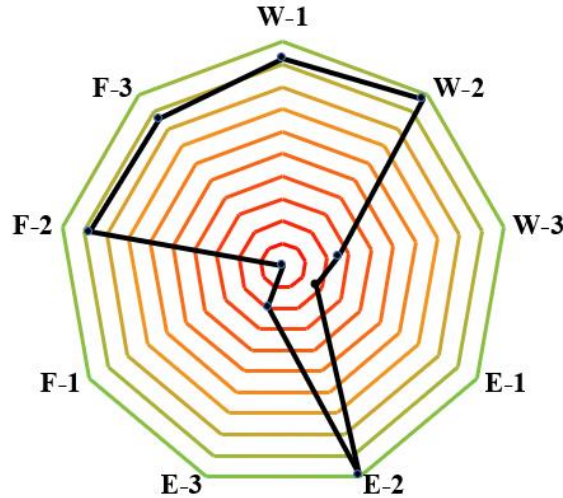


Fig. 1. Representación esquemática de los índices de seguridad hídricos, energéticos y alimentarios en Baja California, México para el año 2022.

Para demostrar la aplicabilidad del modelo matemático se propuso un caso de estudio de la zona noroeste de México. Específicamente, se consideró el Área de Estudio de Baja California (AEBC), la cual cubre aproximadamente el 96.88% del estado de Baja California al no incluir San Quintín y San Felipe. En esta región, existen múltiples centrales de generación de energía disponibles donde fueron estudiadas 15. Además, para satisfacer las demandas de agua de los sectores agrícola, doméstico, ganadero e industrial de la región, se tomaron en cuenta 4 plantas de tratamiento y 5 presas. Los sectores agrícolas, pecuario y pesquero fueron tomados en cuenta a lo largo de los municipios de Mexicali, Tijuana, Ensenada, Playas de Rosarito y Tecate.

Se codificó y resolvió el modelo matemático para el problema multiobjetivo del nexo agua-energía-alimentos en el software GAMS. En primera instancia se maximizó la generación energética (TotEG), después se minimizó el costo total anual (TAC) obteniendo el escenario A, posteriormente se minimizaron las emisiones de CO<sub>2</sub> (GGE\_pp\_CO<sub>2</sub>) (escenario G). Se fijaron 5 puntos intermedios de emisiones de CO<sub>2</sub> y puntos intermedios de los costos entre estos dos escenarios mientras que se maximizó la generación energética en cada uno de estos puntos para generar los

escenarios B, C, D, E y F respectivamente. Obteniendo una problemática multiobjetivo con conflictos de interés entre sí.

Tabla 4. Valores ambientales para los escenarios del caso de estudio (2022) en mil toneladas al año.

Escenario	GEI_CC_CO2	GEI_TE_CO2	GEI_TG_CO2	GEI_pp_CO2
A	3,678.68	943.22	996.32	5,618.23
B	3,096.30	793.90	838.59	4,728.79
C	2,513.92	644.58	680.86	3,839.35
D	1,931.53	495.25	523.13	2,949.92
E	1,318.06	337.95	356.98	2,012.99
F	704.58	180.66	190.83	1,076.07
G	91.11	23.36	24.68	139.15

Tabla 5. Valores económicos para los escenarios del caso de estudio (2022) en millones de dólares al año.

Escenario	CapCost_SP	CapCost_AG	TotCapCost	OMCost_SP	OMCost_AG	TotOMCost	TAC
A	5.96	6,795.47	6,801.43	1,211.87	1,726.07	2,937.94	9,739.37
B	11.18	12,741.51	12,752.68	1,995.40	2,842.05	4,837.45	17,590.13
C	16.39	18,687.54	18,703.93	2,778.94	3,958.04	6,736.98	25,440.91
D	21.61	24,633.58	24,655.18	3,562.49	5,074.05	8,636.53	33,291.72
E	26.82	30,579.61	30,606.43	4,977.19	7,089.01	12,066.20	42,672.64
F	32.04	36,525.65	36,557.69	6,391.91	9,103.99	15,495.90	52,053.59
G	37.25	42,471.69	42,508.94	7,806.63	11,118.97	18,925.60	61,434.53

En la Tabla 4 se presenta el costo total anual (TAC) de cada uno de los escenarios evaluados, así como los costos de capital, operación y mantenimiento asociados a las tecnologías de energía solar y eólica. El escenario A se caracteriza por la minimización de costos en términos generales, lo que implica que los costos totales de capital y los costos totales de operación y mantenimiento reflejan la no adquisición de nuevos sistemas de energía renovable. Los valores indicados representan los costos asociados a mantener los sistemas actuales sin realizar ninguna nueva inversión.

En contraste, el escenario G muestra un comportamiento diferente debido a su objetivo de minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual se traduce en la adquisición de nuevos sistemas de energía renovable sin importar el costo asociado. En la Tabla 3 se pueden observar las emisiones de CO2 generadas (GEI\_pp\_CO2) por las 15 centrales eléctricas consideradas en el estudio. Particularmente en este escenario las emisiones de efecto invernadero son mínimas ya que se tiene la mayor adopción posible de fuentes de energía renovable, proyectando que cerca del 97.8% de la generación total estimada de Baja California provenga de estas fuentes.

Es importante destacar que los escenarios A y G son considerados infactibles. El escenario A es infactible porque, aunque tenga por objetivo reducir costos, conlleva a la falta de inversión en nuevas tecnologías de energía renovable. En la realidad bajo este escenario tanto los costos como las emisiones de gases de efecto invernadero permanecen iguales, lo que significa que este escenario no proporciona mejoras significativas ni sirve como base para evaluar futuros proyectos desde una perspectiva multiobjetivo. Por otro lado, el escenario G es infactible porque proyecta un porcentaje extremadamente alto de fuentes renovables, lo cual implicaría inversiones futuras excesivamente elevadas. Una transición tan drástica no considera el desarrollo sostenible ya que para que un proyecto sea viable en un contexto específico debe tener en cuenta no solo el desarrollo ambiental, sino también los aspectos económicos y sociales. Este último aspecto, el social, tiende a ser olvidado en proyecciones puramente técnicas.

A manera de buscar mantener el bienestar social y maximizar la seguridad energética, se maximiza la generación estimada promedio anual de energía (TotEG) del Estado. Esto se ve reflejado en satisfacer como mínimo el 100% de la demanda energética del caso de estudio en el 2022 (estimada en 12,380.91 GWh), mientras que la generación estimada cambia de acuerdo con la naturaleza de los escenarios. Como se puede observar en la Tabla 5, el tercer y último objetivo se cumple al no generar menos energía de la que se demanda.

*Tabla 6. Generación energética para los escenarios del caso de estudio (2022) en GWh al año.*

Escenario	TotEG
A	14,904.87
B	14,266.25
C	14,038.48
D	12,897.84
E	13,490.54
F	14,421.50
G	14,904.87

La evaluación de estos escenarios demuestra la necesidad de encontrar un equilibrio óptimo que permita una gestión integrada y sostenible de los recursos energéticos. Es crucial considerar tanto las restricciones como los objetivos específicos y encontrar soluciones que maximicen o minimicen las variables planteadas.

En base a los resultados obtenidos, se seleccionaron los escenarios A, C y G para evaluar la resiliencia y viabilidad de cada uno, ya que presentan configuraciones significativamente distintas. El escenario A se caracteriza por no requerir la instalación de nuevos parques solares o eólicos ni un aumento en la generación geotérmica. En este caso, los costos se minimizan al mantener la infraestructura energética existente sin realizar nuevas inversiones en energías renovables. Sin embargo, este escenario no contribuye a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> ni a la diversificación de la matriz energética, lo que puede limitar su sostenibilidad a largo plazo.

El escenario G representa un enfoque más agresivo hacia la minimización de gases de efecto invernadero, implicando la instalación de un número considerable de plantas de energía renovable. Este escenario contempla una expansión masiva, con la instalación de infraestructuras capaces de generar más de 20 veces la energía producida actualmente por La Rumorosa Solar, Fuerza Eólica San Matías, y el Parque Eólico La Rumorosa I. Además, se propone un aumento significativo en la eficiencia de la planta geotérmica Cerro Prieto para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Aunque este escenario es ambicioso y apunta a una reducción de emisiones, también conlleva elevados costos de inversión y desafíos en la implementación a corto plazo.

El escenario C, por su parte, se posiciona como un punto intermedio entre los extremos representados por los escenarios A y G. En este escenario, se propone duplicar la generación actual de energías renovables mediante una combinación equilibrada de energía solar, eólica y geotérmica. Esta estrategia busca una transición más gradual hacia una matriz energética más limpia y diversificada, equilibrando los beneficios ambientales con la viabilidad económica y social. La duplicación de la capacidad de generación renovable permitiría una reducción significativa de emisiones sin incurrir en los costos extremos asociados con el escenario G.

El escenario C fue escogido como el mejor escenario que presentó mayores beneficios a la población respecto al enfoque multiobjetivo. El mejor caso económico (escenario A) indicó que se siguieran usando las 15 centrales eléctricas convencionales y poca energía renovable, la ventaja que presentó fue que en caso de que una fuente energética convencional falle, el sistema puede satisfacer las

demandas correspondientes a cada sector y las fuentes de gestión distribuida aumentan su generación. Para el escenario C se requieren aproximadamente 10 centrales eléctricas además de la instalación de parques solares, eólicos y mejora de la geotérmica para satisfacer la demanda energética mejorando el índice de seguridad. Por otro lado, el escenario que representa la mejor solución ambiental (escenario G) necesita de aproximadamente 2 centrales eléctricas además de la instalación de múltiples parques solares y eólicos; sin embargo, en caso de que las dos unidades energéticas fallen simultáneamente, el sistema dependería completamente de la generación distribuida.

#### 4.2. Enfoque multiobjetivo en los índices de seguridad

Lo que se hizo fue asociar los resultados del enfoque multiobjetivo con los índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos. Dentro del modelo matemático se añadieron los parámetros de costos e impacto ambiental como restricciones, y manejó múltiples objetivos en etapas. El objetivo de agregar las restricciones fue asegurar que el modelo no solo optimice las funciones objetivo definidas, sino que también cumpla con ciertos límites en cuanto a costos e impacto ambiental. Se buscaron nuevas variables de decisión que nos indicaron la producción de energía renovable y la producción de energía convencional que el escenario C resuelve. El valor de 5,194.28 para la generación de energía renovable sugiere que para cumplir con los objetivos del modelo, se deben generar 5,194.28 GWh/año de energía renovable. La energía renovable fue preferida porque su costo y su impacto ambiental cumplen con las restricciones impuestas en el modelo. El valor de 8637.6 GWh/año para la generación de energía convencional indica que es necesario generar energía convencional para cumplir con los objetivos del modelo pero se limita su uso ya que tiene un impacto ambiental significativo y el modelo prefiere evitar su uso para minimizar los gases de efecto invernadero y cumplir con la restricción del impacto ambiental. Finalmente, se agregaron los resultados propuestos por el escenario C en los índices del nexo.

La evaluación de los índices del nexo agua-energía-alimentos a través del gráfico radar se realizó para todos los escenarios de la A a la G (Fig. 2). El gráfico de radar muestra las diferencias en disponibilidad, acceso y sostenibilidad. En

general, los resultados de los índices de energía proyectados son favorables por la oportunidad de implementación hacia la energía de fuentes renovables. Para los otros recursos que componen el nexo (agua y alimentos), los resultados se mantienen iguales debido a que se utilizan como forma de evaluar el estado hídrico y alimentario en el que se encuentra Baja California.

NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, 2022

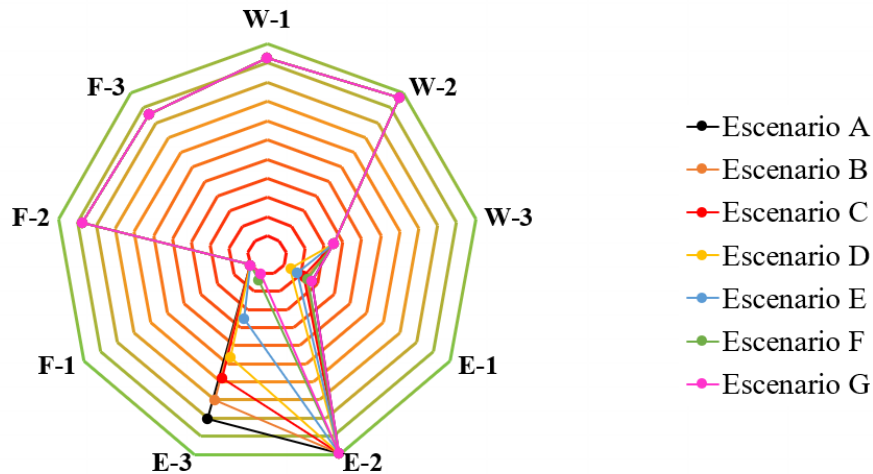


Fig. 2 Representación esquemática del enfoque multiobjetivo en los índices de seguridad hídricos, energéticos y alimentarios en Baja California, México (2022).

La disponibilidad de agua (W-1) mostró un índice de 0.93, reflejando una alta disponibilidad del recurso hídrico durante el año 2022. Este índice es un indicador clave que permite evaluar la suficiencia del suministro de agua en una región específica, proporcionando una medida cuantitativa de la cantidad de agua disponible en relación con la demanda actual. La importancia de este índice radica en su capacidad para servir como herramienta preventiva, ayudando a identificar posibles crisis hídricas antes de que ocurran.

El índice de accesibilidad al agua (W-2), que se situó en 0.97, es un indicador extremadamente favorable que refleja la excelente infraestructura existente para la distribución del agua. Este alto índice indica que la gran mayoría de la población tiene acceso adecuado y confiable al recurso hídrico, lo cual es un componente esencial para el bienestar social y el desarrollo económico. En 2022 para Mexicali el índice tuvo un valor de 0.9837, Tijuana 0.9946, Ensenada 0.8602, Playas de Rosarito 0.9392 y Tecate 0.9392. Aproximadamente el 99% de la población total tiene acceso a un servicio de agua mejorado y el 97% a un servicio de saneamiento mejorado.

El índice de sostenibilidad del agua (W-3), con un valor de 0.25, revela significativos riesgos debido a la dependencia de la importación de aproximadamente la mitad del agua desde otra región (EE.UU.) bajo el Tratado de Aguas de 1944. Esta situación refleja una competencia intensa por el uso del agua en la agricultura, agravada por el crecimiento de la población urbana impulsado por la importancia económica de la región.

La disponibilidad (E-1) y la sostenibilidad (E-3) energética reflejan significativos déficits, con valores de 0.17 y 0.20 respectivamente. La razón de esta brecha en el sector energético se debe al bajo margen existente entre la generación y la demanda eléctrica. Esta pequeña diferencia evidencia la insuficiente producción local de energía para satisfacer una de las tasas de consumo energético más altas de México, lo que pone de manifiesto la vulnerabilidad del sistema energético ante fluctuaciones en la demanda o interrupciones en el suministro.

En términos de sostenibilidad (E-3), la baja puntuación se atribuye a la escasa participación de sistemas de energías renovables, a pesar de las oportunidades existentes para su desarrollo. Esta situación subraya la necesidad urgente de diversificar las fuentes de energía y aumentar la inversión en tecnologías limpias para reducir la dependencia de fuentes no renovables y mejorar la resiliencia del sistema energético.

Por otro lado, el acceso a la energía (E-2) muestra resultados muy favorables, con un valor de 0.99, gracias al correcto diseño de las redes de distribución que garantizan que la gran mayoría de la población tenga acceso confiable a la electricidad. Este alto índice de accesibilidad refleja la eficacia de las políticas y estrategias implementadas para expandir y mantener la infraestructura energética.

La integración del enfoque multiobjetivo en los índices de seguridad energética muestra cambios significativos en dos índices clave: E-1 y E-3. La disponibilidad de energía (E-1) varía, con una tendencia general a disminuir en relación con la reducción de la generación estimada promedio anual (TotEG),

dependiendo de la naturaleza de los diversos escenarios. Sin embargo, se mantiene el objetivo de maximizar la generación energética, asegurando que no caiga por debajo de la demanda, lo que permite que la disponibilidad varíe dentro de rangos aceptables. Por otro lado, el índice de sostenibilidad energética (E-3) aumenta gracias al impulso de las energías renovables; a mayor generación de energía renovable, mayor es el índice de seguridad para la región. Este aumento en E-3 refleja una mejora en la sostenibilidad y resiliencia del sistema energético.

En el caso de los índices alimentarios, es difícil para el Estado mejorar los índices debido al clima severo, la escasez de agua, el tipo de suelo y la ubicación geográfica, factores que son inmutables. La región enfrenta un exceso de oferta alimentaria, lo cual es el principal motivo del riesgo de disponibilidad de alimentos (F-1). Este índice, con un valor de cero, solo indica cuántos alimentos están disponibles en un área determinada y en un tiempo específico. El hecho de que se consuma más de lo requerido no significa que no haya problemas de desnutrición; más bien, refleja una gestión inadecuada de los recursos alimentarios. Además, este exceso de oferta puede llevar a un desperdicio significativo de alimentos, exacerbando los desafíos de sostenibilidad en la región. Este patrón de consumo insostenible no puede mantenerse a largo plazo, destacando la necesidad urgente de mejorar la gestión de los alimentos para adoptar un enfoque más sostenible y equitativo, asegurando que los recursos lleguen a quienes más los necesitan y reduciendo el impacto ambiental de la producción y el consumo de alimentos.

El índice de accesibilidad alimentaria (F-2) es favorable en relación con el poder adquisitivo de la población con un valor de 0.88. Esto indica que la mayoría de la población tiene la capacidad económica para adquirir alimentos suficientes y variados. Este índice refleja una situación positiva en la que los ingresos de los hogares son adecuados para cubrir las necesidades alimentarias básicas, permitiendo un nivel de seguridad alimentaria satisfactorio.

El parámetro de sostenibilidad alimentaria (F-3), con un valor de 0.86, no ha mantenido un riesgo significativo a pesar de que la región depende en cierta medida de las importaciones debido a la baja producción agrícola local en comparación con el consumo de la zona. Esta dependencia no ha generado

problemas actuales, lo que indica que el sistema de importaciones es robusto y confiable. Sin embargo, es fundamental señalar que el clima predominante en gran parte de la región y su proximidad a la frontera hacen que la dependencia de las importaciones sea casi inevitable. Este riesgo podría considerarse menor en comparación con la pérdida de cosechas durante períodos prolongados de sequía, que podrían tener un impacto mucho más severo en la disponibilidad de alimentos.

Para optimizar y evaluar el recurso energético se agregó la propuesta del escenario C en los índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos. Se analizó esta metodología para cuantificar y comparar la resiliencia de los procesos actuales y los propuestos respecto a la energía en Baja California.

NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, 2022

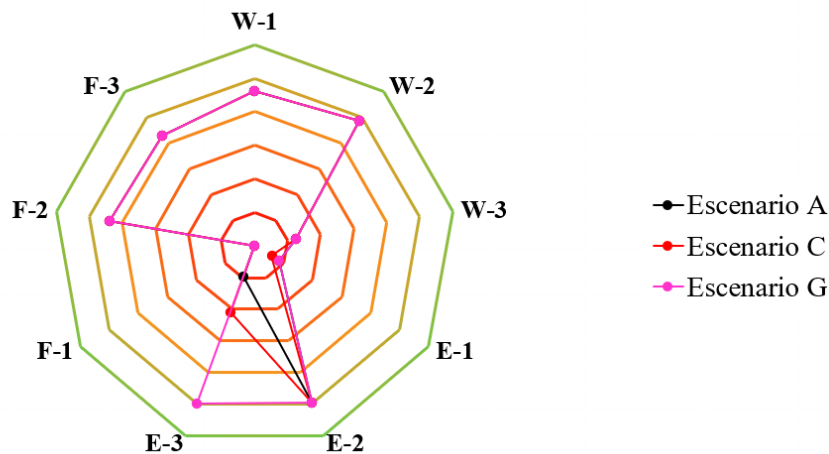


Fig. 3 Representación esquemática del escenario 'C' en los índices de seguridad hídricos, energéticos y alimentarios (2022).

De esta manera, se puede percibir más fácilmente la incorporación de la estrategia que conlleva el escenario C. Se interpretó que, aunque este escenario puede disminuir la generación estimada promedio anual energética, no es necesariamente negativo porque no baja de la demanda requerida. El escenario C se posiciona estratégicamente entre los extremos representados por los escenarios A y G, al incorporar energías renovables, mejorando así el índice de disponibilidad energética sin comprometer la estabilidad del suministro.

Es importante no optar por el escenario G, que implica una transición total a energías renovables, debido a los elevados costos asociados con la

implementación masiva de estas tecnologías. Aunque las energías renovables son fundamentales para un futuro sostenible, una transición abrupta puede imponer una carga financiera significativa tanto a nivel gubernamental como individual, afectando el bienestar económico de la población. Las inversiones masivas y rápidas en energías renovables pueden resultar en aumentos en los costos de energía y requerir un gasto público considerable, lo que podría desviar recursos de otras áreas esenciales como la salud y la educación.

Por otro lado, el escenario A, que representa la opción de no hacer nada y mantener el estado actual sin inversiones adicionales en energías renovables, tampoco es viable. Esta inacción no mejora la sostenibilidad ni la resiliencia del sistema energético y deja al sector vulnerable ante futuras demandas crecientes y potenciales crisis energéticas.

El escenario C emerge como la opción para equilibrar la incorporación de energías renovables con la viabilidad económica, modificando los índices de disponibilidad (E-1) y sustentabilidad (E-3) bajo los criterios multiobjetivo de mantenerse sobre la demanda energética, minimizar los costos de inversión y minimizar los gases de efecto invernadero. Al no comprometerse completamente con un cambio inmediato y total hacia energías renovables, este escenario permite una transición gradual y sostenible. Además, promueve el bienestar económico de las personas al evitar costos excesivos y asegurar que la generación energética se mantenga dentro de los rangos aceptables para satisfacer la demanda sin exceder los límites financieros de la región. En general, el índice de seguridad del nexo agua-energía-alimentos de sustentabilidad de energía (E-3) muestra mejoras significativas debido a la correcta gestión de los recursos y la propuesta del aumento en el uso de energías renovables.

Con referencia a los sectores de agua y alimentos (W-1, W-2, W-3, F-1, F-2 y F-3), los índices se mantienen constantes porque el modelo implica solo evaluarlos; no los optimiza, ya que el modelo no implica el análisis de las variables necesarias para su evaluación por disponibilidad de datos.

El modelo matemático busca satisfacer la cantidad de agua concesionada proveniente de presas para satisfacer la demanda de los distritos de riego de la

zona, esta variable es la única que involucra al sector alimentario. Sin embargo, la evaluación de los índices se muestra porque refleja la situación actual del sistema hídrico y alimentario y posteriormente en futuras investigaciones se puede adaptar para incluir variables manipuladas para su optimización, posiblemente con otros objetivos relacionados con indicadores respecto a la minimización del consumo de agua dulce. En todos los escenarios propuestos, el agua de fuentes superficiales (presas y plantas de tratamiento) se selecciona teniendo en cuenta los niveles de operación de cada una, así como su capacidad, área, cantidad de agua almacenada, y las precipitaciones presentes en el área.

#### 4.3. Resultados del modelo matemático de optimización

El modelo de optimización contiene 743 variables continuas, 40 ecuaciones, 199 funciones no cero y 10 relaciones lineales, lo que lo convierte en un problema LP integrado en la plataforma GAMS. Se ha resuelto el problema LP mediante el optimizador LINDOGLOBAL, y los subproblemas lineales relacionados con la técnica multiobjetivo se han optimizado con el optimizador CPLEX. Se utilizó una estrategia de inicialización, resolviendo primero la reformulación lineal, luego abordando el modelo de optimización por sus objetivos de forma aislada, y finalmente aplicando la estrategia multiobjetivo.

#### 4.4. Propuestas de la optimización de índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos

El enfoque presentado en su primera etapa se centra en la evaluación de los índices de seguridad basados en objetivos individuales optimizados. Los índices que miden la accesibilidad de los tres sectores (agua, energía y alimentos), así como los índices restantes de agua y alimentos (disponibilidad y sustentabilidad), se mantienen constantes. Esto se debe a que el modelo actual no incluye variables de insumo para optimizar estos aspectos, una limitación asociada a la complejidad del sistema.

La disponibilidad de agua (F-1) fue evaluada, indicando una alta seguridad en este aspecto, principalmente debido al correcto uso y distribución del recurso hídrico. La cantidad de agua generada supera el consumo de la población,

considerando las reservas en presas y la posibilidad de tratar aguas residuales para satisfacer ciertas demandas. Esta gestión eficiente garantiza una reserva hídrica adecuada, esencial para la estabilidad y seguridad del suministro de agua.

En futuras evaluaciones, se estima que la sostenibilidad del agua (W-3) alcance su máxima seguridad (100%) al minimizar el costo total anual. Esta configuración sugiere que no será necesario utilizar agua de otras localidades para satisfacer las demandas del estudio de caso, lo cual se traduce en una mayor autosuficiencia hídrica y una reducción de la dependencia externa. Además, al minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, los índices de seguridad hídrica también deberían aumentar debido a la menor participación de agua importada.

La disponibilidad de energía (E-1), en relación con la minimización del consumo de agua dulce, debería aumentar. Este índice depende en gran medida de la capacidad de generar energía a partir de las tecnologías seleccionadas. No se enfoca en la energía generada en sí, sino en la cantidad máxima de energía que se puede producir con las capacidades instaladas. Este enfoque permite evaluar la eficiencia y potencial de las infraestructuras energéticas existentes.

Evaluar la sostenibilidad energética (E-3) es uno de los aspectos más complejos. Este índice se conceptualiza como la capacidad del servicio para mantenerse en el tiempo sin agotar los recursos. La elección de paneles solares u otras tecnologías innovadoras impacta directamente en los costos totales anuales. Aunque estas tecnologías pueden mejorar significativamente la cobertura de las necesidades actuales, existe el riesgo de comprometer la capacidad de las generaciones futuras si no se gestiona adecuadamente el equilibrio entre el crecimiento económico, el medio ambiente y el bienestar social.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES

En la sociedad hiperconectada en la que vivimos hoy en día, el agua, la energía y los alimentos son recursos naturales indispensables, y el interés por ellos radica en que se encuentran cada vez más interrelacionados entre sí. Conforme pasa el tiempo, se contemplan mayores interdependencias entre estos sectores, una situación particularmente extensa en Baja California. Esta región enfrenta desafíos significativos relacionados con la gestión sostenible de estos recursos, desafíos que se ven agravados por los efectos del cambio climático.

El objetivo principal de este estudio fue desarrollar un modelo basado en optimización multiobjetivo que permita determinar escenarios factibles para satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos en Baja California, logrando seguridad entre los involucrados en el nexo agua-energía-alimentos ante los efectos del cambio climático. Este objetivo se cumplió exitosamente a través del desarrollo de un modelo matemático cuantitativo y cualitativo que integró la incorporación de energías renovables. Este modelo proporciona una base sólida para la evaluación de las interrelaciones entre agua, energía y alimentos, permitiendo una comprensión más profunda de las dependencias y sinergias entre estos sectores. El modelo incluye el uso de agua de fuentes superficiales, como presas y plantas de tratamiento. En términos de energía, favorece el uso de fuentes renovables, tales como la energía solar, eólica y geotérmica, además de incluir centrales eléctricas convencionales. Finalmente, para alimentos se agregó información con parámetros e indicadores relevantes.

Se simularon y evaluaron diferentes escenarios del modelo propuesto con ayuda de los índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos, priorizando los impactos del cambio climático y el sector económico. Esta evaluación identificó interconexiones críticas y diagnosticó las principales limitantes, beneficios e inconvenientes de la aplicación del nexo en el estado bajo distintos escenarios.

Además, se construyó un prototipo conceptual óptimo que incorpora energías renovables con un enfoque multiobjetivo de maximización de la generación energética, minimización de GEI y minimización de costos. Este enfoque permitió identificar las combinaciones tecnológicas más adecuadas y sostenibles para la región, asegurando una gestión eficiente de los recursos naturales. Los resultados mostraron que, para el año 2022, la generación óptima total en Baja California fue de 13,831.9223 GWh/año, de los cuales 5194.2813 GWh/año deben provenir de fuentes renovables. Este significativo aumento en el uso de energías renovables, que implica duplicar la generación actual, no solo cumple con los objetivos de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y minimizar costos, sino que también promueve un desarrollo más

sostenible y resiliente para la región mientras que satisfizo la demanda energética al 100%.

El estudio señaló la condición actual del enfoque nexo agua-energía-alimentos en Baja California, destacando su potencial para reducir el impacto ambiental y promover la sostenibilidad en la región. Al identificar los puntos críticos y vulnerabilidades, los responsables de la formulación de políticas pueden desarrollar estrategias más efectivas y sostenibles para la gestión de recursos, asegurando así la seguridad hídrica, energética y alimentaria. El motivo e importancia de un modelo matemático con enfoque del nexo agua-energía-alimentos es que puede sustentar políticas públicas para resolver la problemática específica y variable de Baja California. Este modelo facilita la formulación de estrategias efectivas y sostenibles, asegurando la seguridad hídrica, energética y alimentaria. Además, este enfoque facilita la planificación y la implementación de medidas que promuevan la resiliencia y la sostenibilidad en las comunidades afectadas, contribuyendo al desarrollo sostenible y equitativo a largo plazo.

El enfoque del nexo agua-energía-alimentos permite dinamizar el cumplimiento de los objetivos económicos, ambientales y sociales de las estrategias de desarrollo nacional. Al mismo tiempo, favorece el cumplimiento de los compromisos internacionales adquiridos, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Este enfoque integral no solo permite una comprensión más profunda de las interrelaciones y dependencias entre agua, energía y alimentos, sino que también constituye una valiosa herramienta de apoyo para la toma de decisiones en políticas públicas. Identificar los puntos críticos y vulnerabilidades permite a los responsables de la formulación de políticas desarrollar estrategias más efectivas y sostenibles para la gestión de recursos. Además, este enfoque facilita la planificación y la implementación de medidas que promuevan la resiliencia y la sostenibilidad en las comunidades afectadas, contribuyendo al desarrollo sostenible y equitativo a largo plazo.

El modelo considera también las variaciones en la demanda y la oferta de estos recursos en diferentes escenarios, permitiendo una evaluación integral y dinámica de las posibles estrategias de gestión. Al integrar estas múltiples variables, el modelo ofrece una herramienta poderosa para apoyar la toma de decisiones en políticas públicas, facilitando el desarrollo de estrategias que promuevan la sostenibilidad y la resiliencia en Baja California.

En última instancia, este estudio demuestra que el desarrollo sustentable es alcanzable a través de la integración de un enfoque multiobjetivo que considere todas las interdependencias y sinergias entre los sectores de agua, energía y alimentos. El futuro de Baja California, y de otras regiones similares, depende de la capacidad de implementar políticas y estrategias que no solo respondan a las necesidades actuales, sino que también protejan y conserven los recursos para las generaciones futuras. Este enfoque integral y basado en datos es crucial para

enfrentar los desafíos actuales y futuros relacionados con la seguridad de los recursos en la región, asegurando decisiones eficientes, sostenibles y económicamente viables, beneficiando tanto a las generaciones presentes como a las futuras.

## REFERENCIAS

- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2021). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, pp. 06. Consultado en: [www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario\\_2021.pdf](http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/759492/Inventario_2021.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Consultado en: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/>
- Consejo Nacional de Población [CONAPO]. (2016). Proyecciones de la Población de México y de las entidades federativas 2016-2050 Baja California. Consultado en: [http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Cuadernillos/02\\_Baja\\_California/02\\_BCN.pdf](http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/Cuadernillos/02_Baja_California/02_BCN.pdf)
- Centro Nacional de Control de Energía [CENACE]. (2019). Programa de Ampliación y Modernización de la Red Nacional de Transmisión y Redes Generales de Distribución del Mercado Eléctrico Mayorista. Consultado en: PRODESEN 2019 - 2033
- Secretaría de Energía [SENER]. (2022). Programa de desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2022-2036, pp. 48, 29, 51, 71, 94, 98. Consultado en: [www.cenace.gob.mx/Docs/16\\_MARCOREGULATORIO/Prodecen//16%2022-2036%20Capítulos%201%20al%206.pdf](http://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/Prodecen//16%2022-2036%20Capítulos%201%20al%206.pdf)
- Gobierno de México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2022). México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 1990-2019, pp. 37 Consultado en: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/InventarioGEI\\_Mexico\\_1990\\_2019.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/InventarioGEI_Mexico_1990_2019.pdf)
- Cortez Lara, A. (2021, agosto). Recorte de agua para Baja California en 2022. *Departamento de Estudios Urbanos y del Medio Ambiente de El Colegio de la Frontera Norte (COLEF)*. Consultado en: Recorte de agua para Baja California en 2022 | El Colegio de la Frontera Norte
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2021). Estadísticas del Agua en México 2021, pp. 31, 52, 87, 186. Consultado en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2002). Compendio de estadísticas ambientales 2002. Consultado en: [https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas\\_2000/informe\\_2000/04\\_Agua/4.4\\_Disponibilidad/index.htm#:~:text=Una%20disponibilidad%20por%20debajo%20de,es%20el%20caso%20de%20M%C3%A9xico](https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/informe02/estadisticas_2000/informe_2000/04_Agua/4.4_Disponibilidad/index.htm#:~:text=Una%20disponibilidad%20por%20debajo%20de,es%20el%20caso%20de%20M%C3%A9xico)).
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2008). Programa de Desarrollo Rural - Baja California. *Informe de Evaluación Estatal*, p. 29. Consultado en: [www.agricultura.gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2018/11/16/1535/16112018-2007-bac-dr.pdf](http://www.agricultura.gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2018/11/16/1535/16112018-2007-bac-dr.pdf)
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADE]. (2021). ¿Conoces qué se produce en Baja California? Consultado en: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/conoces-que-se-produce-en-baja-california?idiom=es#:~:text=En%20la%20actividad%20agr%C3%ADcola%20os,rojo%20137%20mil%20632%20t>
- Secretaría de Hacienda de Baja California [SHBC]. (2019). Evaluación del Desempeño de la GESTIÓN ESTATAL (2019-2021) Productividad del Campo en Baja California, p. 03. Consultado en: [www.bajacalifornia.gob.mx/Documentos/indicadoresbc/seguimiento-evaluaciones/2019-2021/Evaluacion%20-%20Productividad%20del%20Campo.pdf](http://www.bajacalifornia.gob.mx/Documentos/indicadoresbc/seguimiento-evaluaciones/2019-2021/Evaluacion%20-%20Productividad%20del%20Campo.pdf)
- Organización Panamericana de la Salud. (s.f.). Cambio Climático y Salud. *Revista digital de la Organización Panamericana de la Salud*. Consultado en: Cambio Climático y Salud - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud
- Comisión Estatal del Agua de Baja California [CEABC]. (2016). Programa Hídrico del Estado de Baja California Visión 2035. CONAGUA. P. 67. Consultado en: <http://www.cea.gob.mx/phebc/resejec/RESUMEN%20EJECUTIVO%20PHEBC.pdf>
- Marcus, F. (2000). ¡Agua en la frontera! - Situación y tendencias. *El medio ambiente y la economía en la frontera entre México y Estados Unidos: Llamamiento a la Acción para convertir la Región de la Frontera entre México y Estados Unidos en un Modelo de Cooperación Binacional para la Sustentabilidad*, (pp. 49-66). EEUU: Aspen Institute. Consultado en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12214202>

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2016, septiembre). Introducción a la temática nexo agua, energía y alimentación. Presentación de la Reunión de Expertos “Gobernanza del Nexo Agua, Energía y Alimentación: Desafíos de la Agenda 2030 en Agua y Saneamiento”. Consultado en: Introducción a la temática nexo agua, energía y alimentación
- Tejedor Flores, N. (2018). Desarrollo Sostenible y Nexo Agua-Energía-Alimentos: Una Perspectiva Multivariante. Universidad de Salamanca. Consultado en: Tesis - Desarrollo Sostenible y Nexo Agua-Energía-Alimentos: Una Perspectiva Multivariante
- B. A. Willaarts, et al.” Análisis comparativo de acciones con enfoque del Nexo Agua-Energía-Alimentación: lecciones aprendidas para los países de América Latina y el Caribe”, serie Recursos Naturales y Desarrollo, No 204 (LC/TS.2021/18), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021. Consultado en: Análisis comparativo de acciones con enfoque del Nexo Agua-Energía-Alimentación
- Embid, A., & Martin, L.” El Nexo entre el agua, la energía y la alimentación en América Latina y el Caribe”, serie Recursos Naturales e Infraestructura, N° 179 (LC/TS.2017/16), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2017. Consultado en: El Nexo entre el agua, la energía y la alimentación en América Latina y el Caribe 179
- Luiz Giatti, L., et al. (2019, enero). Nexos de exclusión y desafíos de sostenibilidad y salud en una periferia urbana en Brasil. *Cuadernos de Salud Pública [CPS]*. Consultado en: <https://doi.org/10.1590/0102-311X00007918>
- Organización Latinoamericana de Energía [OLADE]. (2021). Electrificación de la última milla del corredor mesoamericano. Solución del nexo agua-alimentación-energía. *Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe, Volumen V., Número 1, p. 10-33*. Consultado en: <http://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/146/210>
- Red Global de Hospitales Verdes y Saludables. (s.f.). El problema global, Soluciones hospitalarias y Acciones concretas. *Salud sin Daño - América Latina*. Consultado en: <https://hospitalesporlasaludambiental.org/energia>
- Sánchez Zarco, X. (2021). Optimización de índices de seguridad del nexo agua-energía-alimentos y resiliencia ante catástrofes climatológicas en una zona semiárida. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Consultado en: [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB\\_UMICH/4928/FIQ-M-2021-0131.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/4928/FIQ-M-2021-0131.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- F. Saladini, et al. (2018). Linking the water-energy-food nexus and sustainable development indicators for the Mediterranean region. *Ecological Indicators*. Volumen 91, 689-697. Consultado en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.035>
- Animesh K. Gain, et al. (2016, diciembre). Measuring global water security towards sustainable development goals. *Environmental Research Letters*. Volumen 11, Número 12. Consultado en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/12/124015/meta>
- Peniche, S. (2021). El nexo agua, energía y alimentación - Apuntes desde la perspectiva de la economía ecológica en el caso mexicano. *SaberEs*, ISSN-e 1852-4222, Vol. 13, N°. 1, págs. 57-72. Consultado en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8115227>
- Dai, J., et al. (2018). Water-energy nexus: A review of methods and tools for macro-assessment. *Applied Energy*, 393–408. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.243>
- Endo, A., et al. (2017, Junio). A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volumen 11, 20-30. ISSN 2214-5818. Consultado en: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.010>
- Saladini, F., et al. (2018, Agosto). Linking the water-energy-food nexus and sustainable development indicators for the Mediterranean region. *Ecological Indicators*. Volumen 91, 689-697. Consultado en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.035>
- Zhang, C., et al. (2018, Septiembre). Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies. *Journal of Cleaner Production*, Volumen 195, 625-639. Consultado en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.194>
- L. Naranjo y B. A. Willaarts, “Guía metodológica: diseño de acciones con enfoque del Nexo entre agua, energía y alimentación para países de América Latina y el Caribe”, serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 197 LC/TS.2020/117, Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2020. Consultado en: Guía metodológica: diseño de acciones con enfoque del Nexo entre agua, energía y alimentación para países de América Lati
- Brundtland, G. (1987). Our Common Future - Call for Action. *Environmental Conservation*. Volumen 14, pp. 291-294. Consultado en: <https://doi.org/10.1017/S0376892900016805>

- Daher, B. T., & Mohtar, R. H. (2015). Water–energy–food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. *Water International*, 40(5-6), 748–771. Consultado en: <https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1074148>
- Giampietro, M., et al. (2013). An Innovative Accounting Framework for the Food-Energy-Water Nexus - Application of the MuSIASEM approach to three case studies. *Environment and Natural Resources Working Paper No.56 – FAO, Rome*. Consultado en: <https://www.fao.org/3/i3468e/i3468e.pdf>
- Giampietro, M., Mayumi, K., & Ramos-Martin, J. (2009). Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism (MuSIASEM): Theoretical concepts and basic rationale. *Energy*, 34(3), 313–322. Consultado en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.020>
- Martinez-Hernandez, E., Leach, M., & Yang, A. (2017). Understanding water-energy-food and ecosystem interactions using the nexus simulation tool NexSym. *Applied Energy*, 206, 1009–1021. Consultado en: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.022>
- Davies, E.G.R. & Simonovic, S.P. (2010) ANEMI: a new model for integrated assessment of global change. *Interdisciplinary Environmental Review*, Vol. 11, Nos. 2/3, pp.127-161. Consultado en: <https://www.inderscienceonline.com/doi/pdf/10.1504/IER.2010.037903>
- Heaps, C. (2022). LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Software version: 2020.1.63]. *Stockholm Environment Institute*. Somerville, MA, USA. Consultado en: <https://leap.sei.org>
- Yates, D., et al. (2005). WEAP21--A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model: Part 1, Model Characteristics. *Water International*, Vol. 30, No. 4, pp. 487-500. Consultado en: <https://doi:10.1080/02508060508691893>
- Karnib, A. (2017). Water-Energy-Food Nexus: A Coupled Simulation and Optimization Framework. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5, 84-98. Consultado en: <https://doi.org/10.4236/gep.2017.54008>
- Shannak, S., Mabrey, D., & Vittorio, M. (2018). Moving from theory to practice in the water–energy–food nexus: An evaluation of existing models and frameworks. *Water-Energy Nexus*, 1(1), 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2018.04.001>
- Norouzi, N. (2021). Presenting a conceptual model of water-energy-food nexus in Iran. *Current Research in Environmental Sustainability Volumen 4*, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100119>

- Owen, A., Scott, K., & Barrett, J. (2018). Identifying critical supply chains and final products: An input-output approach to exploring the energy-water-food nexus. *Applied Energy*, 210, 632–642. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.069>
- Wang, S., Cao, T., & Chen, B. (2017). Urban energy–water nexus based on modified input–output analysis. *Applied Energy*, 196, 208–217. [10.1016/j.apenergy.2017.02.011](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.011)
- Nawab, A., et al. (2019). Exploring Urban Energy-Water Nexus Embodied in Domestic and International Trade: A Case of Shanghai. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.119>
- Fang, D., & Chen, B. (2018). Linkage analysis for water-carbon nexus in China. *Applied Energy*, 225, 682–695. [10.1016/j.apenergy.2018.05.058](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.058)
- Opoku, E. et al. (2022). Quantifying and analysing water trade-offs in the water-energy-food nexus: The case of Ghana. *Water-Energy Nexus*, 5, 8-20. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2022.06.001>
- Boluwade, A. . (2021). Impacts of climatic change and database information design on the water-energy-food nexus in water-scarce regions. *Water-Energy Nexus*, 4, 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.03.002>
- Endo, A., et al. (2017). A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.010>
- Zhang, P. et al. (2021). Quantifying the water-energy-food nexus in Guangdong, Hong Kong, and Macao regions. *Sustainable Production and Consumption* Volumen 29, P. 188-200. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.09.022>
- Radmehr, R., Ghorbani, M., & Ziaei, A. N. (2020). Quantifying and managing the water-energy-food nexus in dry regions food insecurity: New methods and evidence. *Agricultural Water Management*, 106588. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106588>
- Wang, Q., et al. (2018). Evaluating Sustainability of Water-Energy-Food (WEF) Nexus Using an Improved Matter-Element Extension Model: A Case Study of China. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.213>
- Zhang, T., et al. (2020). Synergy assessment and optimization for water-energy-food nexus: Modeling and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110059. [10.1016/j.rser.2020.110059](https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110059)

- Lund, A. et al. (2022). Tracing the inclusion of health as a component of the food-energy-water nexus in dam management in the Senegal River Basin. *Environmental Science and Policy* 133. 74-86. [10.1016/j.envsci.2022.03.005](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.005)
- Yan, X., Fang, L., & Mu, L. (2019). How does the water-energy-food nexus work in developing countries? An empirical study of China. *Science of The Total Environment*, 134791. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134791>
- Saladini, F., et al. (2018). Linking the water-energy-food nexus and sustainable development indicators for the Mediterranean region. *Ecological Indicators*, 91, 689–697. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.035>
- Putra, M., Pradhan, P., & Kropp, J. (2020). A systematic analysis of Water-Energy-Food security nexus: A South Asian case study. *Science of The Total Environment*, 138451. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138451>
- 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. *Sustainable Production and Consumption*, 28, 1249–1261. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.08.005>
- Lebel, L., Haefner, A., Pahl-Wostl, C., & Baduri, A. (2020). Governance of the water-energy-food nexus: insights from four infrastructure projects in the Lower Mekong Basin. *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.08.008>
- Rodríguez-Gutiérrez, J., Castillo-Molar, A., & Fuentes-Cortés, L. (2022). A multi-objective assessment for the water-energy-food nexus for rural distributed energy systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 51. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101956>
- Medina-Santana, A. A., Flores-Tlacuahuac, A., Cárdenas-Barrón, L. E., & Fuentes-Cortés, L. F. (2020). Optimal design of the water-energy-food nexus for rural communities. *Computers & Chemical Engineering*, 143, 107120. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.101956>
- Fuentes-Cortés, L., González-Bravo, R., Flores-Tlacuahuac, A., y Ponce-Ortega, J. (2019). Optimal sustainable water-Energy storage strategies for off-grid systems in low-income communities. *Computers & Chemical Engineering*, 123, 87–109. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.12.023>
- Cansino-Loeza, B., & Ponce-Ortega, J. M. (2020). Sustainable assessment of Water-Energy-Food Nexus at regional level through a multi-stakeholder optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125194>

- Núñez-López, J., Rubio-Castro, E., El-Halwagi, M., & Ponce-Ortega, J. (2018). Optimal design of total integrated residential complexes involving water-energy-waste nexus. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(5), 1061–1085. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1537-z>
- IHME. (2016). GBDCmpareDataVisualization. Recuperado 13 de noviembre, a partir de <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>
- Biggs, E. et al. (2015). Sustainable development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 54, 389–397. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>
- Yalew, S. et al. (2020). *Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios*. *Nature Energy*. Volume 5, p. 794–802. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0664-z>
- Gerten, D., Heck, V., Jägermeyr, J., Bodirsky, B. L., Fetzer, I., Jalava, M., et al. (2020). Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sustainability*, 3(3), 200–208. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0465-1>
- Ward, F. A., & Pulido-Velazquez, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(47), 18215–18220. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805554105>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2019). Estadísticas del Agua en México 2019. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones>
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R., Kraxner, F., & Estrada, F. (2020). Spatial conservation prioritization for biodiversity in a megadiverse country. *Anthropocene*, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2020.100267>
- Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2015). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California 2015. [https://www.bajacalifornia.gob.mx/medio\\_ambiente/Programas\\_Proyectos/Cambio\\_Climatico](https://www.bajacalifornia.gob.mx/medio_ambiente/Programas_Proyectos/Cambio_Climatico)
- Banco Mundial. (2017). El agua en la agricultura. Página web: <https://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture#:~:text=En%20promedio%2C%20en%20la%20agricultura,cuenta n%20con%20instalaciones%20de%20riego>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). Movimientos migratorios 2020. Página web: [https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/m\\_migratorios.aspx?tema=me&e=02#:~:text=A%202020%2C%20de%20Baja%20California,a%20Estados%20Unidos%20de%20Am%C3%A9rica](https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/m_migratorios.aspx?tema=me&e=02#:~:text=A%202020%2C%20de%20Baja%20California,a%20Estados%20Unidos%20de%20Am%C3%A9rica)
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Página web: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios [COFEPRIS]. (2017). Efectos a la salud por la contaminación del aire ambiente. Página web: <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/3-efectos-a-la-salud-por-la-contaminacion-del-aire-ambiente#:~:text=Puede%20causar%20problemas%20respiratorios%2C%20provocar,que%20m%C3%A1s%20preocupan%20en%20Europa.>
- M. Ehrgott and M. M. Wiecek, "Multiobjective programming," en *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, Estados Unidos, Springer, 2005, pp. 667-722.
- R. Marler and J. Arora, "Survey of multi-objective optimization methods for engineering," *Struct Multidisc Optim*, 26. pp. 369–395, 2004.
- Núñez-Lopez, J. (2022). "Análisis de la Resiliencia en Sistemas de Optimización a Nivel Macroscópico Involucrando el Nexo Agua-Energía-Alimentos".
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2021 González Terrazas D., Vermonden Thibodeau A., Gress Carrasco F., Municipios Vulnerables al Cambio Climático con base en los resultados del Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático. pp.60
- Dhaubanjhar, S., Davidsen, C., & Bauer-Gottwein, P. (2017). Multi-Objective Optimization for Analysis of Changing Trade-Offs in the Nepalese Water–Energy–Food Nexus with Hydropower Development. *Water*, 9(3), 162. Disponible en: MDPI.
- Correa-Porcel, V., Piedra-Muñoz, L., & Galdeano-Gómez, E. (2021). Water–Energy–Food Nexus in the Agri-Food Sector: Research Trends and Innovating Practices. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(24), 12966. Disponible en: MDPI.

Sabogal, D. G. Carlos, M. del Castillo, B. Willems, S. Bleeker, F. Meza, H. Bellfield, C. Rengifo, T. Peñaherrera. 2018. Manual Metodológico para el análisis del Nexo agua-energía-alimentos en cuencas amazónicas. Global Canopy, CEDISA, CCA.