



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**
DIVISIÓN DE POSGRADO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUÍMICA

**OPTIMIZACIÓN DE ÍNDICES DE SEGURIDAD DEL NEXO
AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS Y RESILIENCIA ANTE
CATÁSTROFES CLIMATOLÓGICAS EN UNA ZONA SEMIÁRIDA**

PRESENTA

I.Q. Xaté Geraldine Sánchez Zarco

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José María Ponce Ortega

Morelia Michoacán, Febrero 2021

OPTIMIZACIÓN DE ÍNDICES DE SEGURIDAD DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS Y RESILIENCIA ANTE CATÁSTROFES CLIMATOLÓGICAS EN UNA ZONA SEMIÁRIDA

Por: Ing. Xate Geraldine Sánchez Zarco

RESUMEN

Sequías hidrológicas e inundaciones están previstas por el aumento de temperatura y deshielo Ártico, poniendo en riesgo a diversas poblaciones alrededor del mundo; en donde, la reubicación de las mismas, la actividad económica y de las infraestructuras representarían un costo elevado convirtiéndose en problemas severos que no han sido resueltos de forma eficiente. Un mayor desafío se presenta en zonas áridas, en donde los cambios climáticos extremos representan una amenaza para lograr el bienestar humano, debido a la disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de agua-energía-alimentos. Los modelos de optimización permiten analizar datos de áreas de interés y proyectar soluciones ante problemáticas específicas, con la predicción de escenarios futuros. Incorporando funciones objetivo que impacten en el aspecto social, económico y de medio ambiente, en este trabajo se propone alcanzar la Seguridad Hídrica, Energética y Alimentaria satisfaciendo las demandas de la población al 100%. Además, se analiza la resiliencia con escenarios inciertos ante las condiciones de cambio climático mediante un estudio multidisciplinario para la fiabilidad y sustentabilidad en la gestión de los recursos. Se propone analizar, como caso de estudio, el Área Metropolitana de Monterrey (AMM); una zona semiárida localizada en el noroeste de México, región en donde su crecimiento acelerado de población y economía generan estrés sobre sus recursos naturales. De igual manera, se espera reducir el riesgo social por conflictos al derecho de los recursos naturales, orientando hacia la toma de decisiones con un enfoque de optimización de múltiples partes interesadas.

Palabras clave: Optimización MINLP, Nexos Agua-Energía-Alimentos, Seguridad Hídrica, Energética y Alimentaria, Resiliencia, Desastres naturales.

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega

OPTIMIZATION OF SECURITY INDEXES OF THE WATER-ENERGY-FOOD NEXUS AND RESILIENCE IN THE FACE OF CLIMATOLOGICAL DISASTERS IN A SEMI-ARID AREA

By: Eng. Xaté Geraldine Sánchez Zarco

ABSTRACT

Climate change is the greatest risk that humanity must face, which affects security for the availability, accessibility and sustainability for water, energy and food (WEF) nexus. In this sense, the evaluation of individual indices makes possible to quantify and identify the interactions between the involved parties for the design and adaptation of new policies to improve and facilitate decision-making. The need to quantitatively measure the security of the Nexus sectors in the same system is of great importance due to the vulnerability of each sector and the variability of costs. This paper presents an approach to optimizing the Security Indices of the WEF Nexus that analyzes the availability, accessibility and sustainability of water, energy, and food resources. A Mixed Integer Nonlinear Programming model is presented with a multi-objective criterion of multi-stakeholders, the selection of sources for obtaining water and different technologies for power generation are analyzed considering economic and environmental aspects. Furthermore, the optimization model shows the response of selecting different technologies, maximizing the value of the evaluated indices, and improving the performance of the studied area. Different scenarios were created to observe the behavior of the objective functions (minimizing total annual cost, fresh water consumption, and greenhouse gas emissions) and the indices are illustrated in radar graphs that allow identifying the interactions between the involved sectors. A case study from a region of Mexico is analyzed; however, the model is applicable to any region with similar characteristics.

Keywords: Water-Energy-Food Nexus; Security; Resilience; Resource Scarcity; Optimization.

Directed by: Dr. José María Ponce Ortega

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	viii
NOMENCLATURA.....	ix
AGRADECIMIENTOS.....	xx
Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 GENERALIDADES.....	2
1.2 ANTECEDENTES.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2 Objetivos Particulares.....	8
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	9
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.6 HIPÓTESIS.....	12
1.7 CASO DE ESTUDIO.....	12
1.7.1 Datos Generales Y Clima.....	12
1.7.2 Agua.....	14
1.7.3 Alimentos.....	15
1.7.4 Agricultura.....	16
1.7.5 Ganadería.....	16
1.7.6 Energía.....	17
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS.....	22

2.2 ISLAS DE RECURSOS URBANOS	23
2.3 ISLA DE CALOR HUMANA.....	23
2.4 RESILIENCIA	24
2.5 OPTIMIZACIÓN	24
2.6 PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA	25
Capítulo 3 METODOLOGÍA.....	26
3.1 SUPERESTRUCTURA.....	27
3.2 METODOLOGÍA PROPUESTA DE ÍNDICES DE SEGURIDAD DEL NEXO WEF EN UNA REGIÓN.....	28
3.3 MODELO MATEMÁTICO	33
3.3.1 Agua.....	34
3.3.2 Energía.....	40
3.3.3 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	44
3.3.4 Costos	44
3.3.5 Costos Total Anual	46
3.3.6 Función Objetivo	47
3.3.7 Índices de Seguridad de Nexo WEF.....	47
3.3.8 Enfoque Multistakeholder.....	49
3.4 METODOLOGÍA PROPUESTA DE RESILIENCIA ANTE CATÁSTROFES NATURALES.....	50
Capítulo 4 RESULTADOS	53
4.1 RESULTADOS DE ÍNDICES DE SEGURIDAD DEL NEXO WEF	54
4.2 RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA SEGURIDAD HÍDRICA- ENERGÉTICA-ALIMENTARIA	59
4.3 EVALUACIÓN DE ÍNDICES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY.....	63

4.4 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO	66
4.4.1 Resultados de Objetivos Individuales.....	66
4.4.2 Resultados de Optimización de Índices de Seguridad	70
4.5 RESULTADOS DE RESILIENCIA ANTE CATÁSTROFES NATURALES	79
CONCLUSIONES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
APÉNDICE A. PUBLICACIONES	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Interacciones Entre los Sectores Involucrados en el Nexo WEF.....	6
Figura 1.2 Descripción Esquemática de la Justificación.....	10
Figura 1.3 Caso de Estudio, Área Metropolitana de Monterrey.....	13
Figura 1.4 Patrón de Consumo de Alimentos en NL (EESNL, 2016).....	15
Figura 1.5 Porcentaje de Consumo Eléctrico por Sector en el Estado de Nuevo León.....	18
Figura 1.6 Porcentaje de Producción Eléctrica por Tecnología en el Estado de Nuevo León.	19
Figura 1.7 Flujos de Agua, Energía y Alimentos en el Estado de Nuevo León.....	20
Figura 2.1 Interacciones del Nexo Agua-Energía-Alimentos.	23
Figura 3.1 Superestructura Propuesta.	27
Figura 3.2 Metodología Propuesta Para Evaluación de Índices de Seguridad del Nexo WEF.	29
Figura 3.3 Representación Matricial Tridimensional.	50
Figura 3.4 Representación Matricial Bidimensional.	51
Figura 3.5 Matriz de Resiliencia Bidimensional.	51
Figura 4.1 Representación Esquemática de los Índices de Seguridad Evaluados en el Estado de Nuevo León México (2019).....	54
Figura 4.2 Índices Calculados de 2013 a 2030 del Nexo WEF.....	55
Figura 4.3 Escenarios Propuestos Para Índices Calculados con Reducción del Uso de Agua Agrícola y Doméstica. a) Año 2025, b) Año 2030.	62
Figura 4.4 Flujos asociados al Nexo Agua-Energía-Alimentos en AMM.	63
Figura 4.5 Evaluación de Índices WEF Para el Área Metropolitana de Monterrey en 2019.	64
Figura 4.6 Representación de Objetivos Individuales Para el Caso de Estudio Abordado. 68	
Figura 4.7 Solución Minimizando el Costo Total Anual (TAC).....	72
Figura 4.8 Solución que Minimiza el Consumo Total de Agua Dulce (TotFreshW).....	73
Figura 4.9 Solución Minimizando las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (TotGHGE).....	74

Figura 4.10 Soluciones Factibles de Multi-stakeholder: A) Min TAC, B) Min TotFreshW, C) Min TotGHGE.	75
Figura 4.11 Índices de Seguridad de Nexos WEF: A) Min TAC, B) Min TotFreshW, C) Min TotGHGE.	77
Figura 4.12 Matriz Tridimensional Para el Caso de Estudio de AMM.	79
Figura 4.13 Índices de Riesgo Para AMM.	80

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Precipitaciones Para las Distintas Áreas del Estado de Nuevo León (SEDAGRO, 2019).	13
Tabla 3.1 Parámetros Referentes a Alimentos Para Diferentes Años, (FAO 2017).	31
Tabla 3.2 Principales Parámetros Utilizados Para el Estudio de Caso Abordado.	33
Tabla 4.1 Índices Según Tasa de Crecimiento Anual de 2013 a 2030.....	57
Tabla 4.2 Crecimiento Porcentual Anual del Índice de Disponibilidad del Sector del Agua con Reducción del Consumo de Agua en Agricultura y Uso Público.	61
Tabla 4.3 Resultados Principales Minimizando los Objetivos Individuales.	67
Tabla 4.4 Resultados del Análisis de Multi-stakeholder.....	76
Tabla 4.5 Costos de penalización por Nexos Agua-Energía-Alimentos en diferentes años. 79	
Tabla 4.6 Matriz Bidimensional del AMM.	80
Tabla 4.7 Índices de resiliencia en AMM.	81

NOMENCLATURA

Conjuntos

c	Conjunto para cada municipio (Apodaca, Cadereyta Jiménez, El Carmen, García, San Pedro Garza García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y Santiago)
d	Conjunto para cada presa (Cuchillo, La Boca, Cerro Prieto)
g	Conjunto para cada planta tratadora de agua (Dulces Nombres, Planta Norte, Planta Noreste, Planta Santa Rosa)
p	Centrales eléctricas (Iberdrola energía Monterrey; Iberdrola energía Monterrey, Dulces Nombres; Iberdrola energía Monterrey, Monterrey III; Huinalá II; Huinalá CC)
po	Contaminantes (CO ₂ , NO _x , SO ₂)
t	Conjunto referente al tiempo (Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre, Diciembre)
ww	Conjunto para cada sistema de agua subterráneo (Minas, Buenos Aires y Monterrey)

Parámetros

α^{BW}	Factor de conversión para aguas negras
α^{GW}	Factor de conversión para aguas grises
α^{GWT}	Factor de conversión para planta tratadora de agua
γ_{po}^{Biogas}	Factor de emisión asociado a la planta de biogás
$\gamma_{p,po}^{Fuel}$	Factor de emisión asociado a cada combustible
δ^{Biogas}	Factor de conversión para Biogás

η_p^{Fuel}	Eficiencia del combustible quemado
η^{SP}	Eficiencia de paneles solares
κ_F	Factor de anualización de carga fija
ρ^{air}	Densidad del aire
A_d^{Dam}	Área disponible para cada presa
$A_c^{\text{HRW-MAX}}$	Área máxima disponible en cada municipio para colectores pluviales
$A_c^{\text{HRW-MIN}}$	Área mínima disponible en cada municipio para colectores pluviales
$A_c^{\text{rotor-MAX}}$	Área máxima disponible para la instalación de aerogeneradores
$A_c^{\text{SP-MAX}}$	Área de instalación máxima disponible para paneles solares
AveDEC_r	Energía promedio consumida en una dieta
AveDER_r	Energía promedio requerida en una dieta
$\text{Cap}_d^{\text{Dam-Min}}$	Capacidad mínima de agua en cada presa
$\text{Cap}^{\text{MSW-MAX}}$	Capacidad máxima de residuos sólidos tratados
$\text{Cap}_p^{\text{PP-MAX}}$	Capacidad máxima de cada central eléctrica
$\text{Cap}_c^{\text{RWSS-MAX}}$	Capacidad máxima de cada sistema de almacenamiento de agua pluvial

$Cap_g^{TBW-MAX}$	Capacidad máxima de cada planta de tratamiento de agua negras existente
$Cap_g^{TGW-MAX}$	Capacidad máxima de cada planta de tratamiento de aguas gris existente
$Cap_{ww}^{Well-MAX}$	Capacidad máxima de extracción de agua subterránea
Cereals	Cantidad de cereales
CP^{max}	Coficiente de potencia máxima para aerogeneradores
$EDemand_{c,t}^{Cattle}$	Demanda de energía para uso en ganadería
$EDemand_{c,t}^D$	Demanda de electricidad enviada para uso doméstico
$EDemand_{c,t}^I$	Demanda de electricidad enviada para uso industrial
$EDemand_{c,t}^{Pumping}$	Demanda de energía para uso en bombeo
$EDemand_{c,t}^{SL}$	Demanda de energía enviada para uso en alumbrado público
$EDemand_t^{SW}$	Demanda de energía para Sistema Metropolitano de Transporte Colectivo (metro)
$FCost^{AG}$	Costo fijo de aerogeneradores
$FCost^{HRW}$	Costo fijo de colectores pluviales
$FCost^{SP}$	Costo fijo de paneles solares
Eggs	Cantidad de huevos
$h_{c,t}$	Factor de radiación solar
Meat	Cantidad de carne

Milk	Cantidad de leche
Nuts	Cantidad de nuez
$NR_{d,t}$	Recarga natural
$NumbEAG_{c=12}$	Número de aerogeneradores existentes
PR	Coefficiente de rendimiento para paneles solares
$RF_{c,t}$	Precipitaciones
$TotFoodDC_r$	Cantidad total de comida consumida
$TotPop_r$	Población total
$TotPopWACCE_r$	Población total sin acceso a energía
$TotPopWACCW_r$	Población total sin acceso a agua dulce
$TotQImporFood_r$	Cantidad Total de comida importada
$UCOM^{AG}$	Costo unitario de operación y mantenimiento de aerogeneradores
$UCOM^{Biogas}$	Costo unitario de operación y mantenimiento de planta de Biogás
$UCOM^{HRW}$	Costo unitario de operación y mantenimiento de colectores pluviales
$UCOM^{PP}$	Costo unitario de operación y mantenimiento de centrales eléctricas
$UCOM^{SP}$	Costo unitario de operación y mantenimiento de paneles solares
$UCOM^{TGW}$	Costo unitario de operación y mantenimiento de planta tratadora de aguas grises

$UnPop_r$	Población en desnutrición
$UPumpCost_{d,c}^{Dam-D}$	Costo unitario de bombeo de agua de la presa para uso doméstico
$UPumpCost_{d,c}^{Dam-G}$	Costo unitario de bombeo de agua de la presa para jardinería
$UPumpCost_{d,c}^{Dam-I}$	Costo unitario de bombeo de agua de la presa para industria
$UPumpCost_c^{HRW-D}$	Costo unitario de bombeo de agua desde colectores pluviales para uso doméstico
$UPumpCost_{c,t}^{HRW-G}$	Costo unitario de bombeo de agua de colectores pluviales para jardinería
$UPumpCost_c^{HRW-I}$	Costo unitario de bombeo de agua desde colectores pluviales para industria
$UPumpCost_{g,c}^{TGW-G}$	Costo unitario de bombeo de aguas grises tratadas para jardinería
$UPumpCost_{g,c}^{TGW-I}$	Costo unitario de bombeo de aguas grises tratadas para uso industrial
$UPumpCost_{ww,c}^{Well-D}$	Costo unitario de bombeo de agua de pozo para uso domestico
$UPumpCost_{ww,c}^{Well-G}$	Costo unitario de bombeo de agua desde pozo para jardinería
$UPumpCost_{ww,c}^{Well-I}$	Costo unitario de bombeo de agua desde pozo para industria
Vegetables	Cantidad de vegetales
$VCost^{AG}$	Costo variable de aerogeneradores
$VCost^{HRW}$	Costo variable de colectores pluviales
$VCost^{SP}$	Costo Variable de paneles solares
$W_d^{DamZero}$	Cantidad de agua almacenada en el primer período de tiempo
$W_{d,t}^{Evap}$	Cantidad de agua evaporada en cada presa

$W_{d,t}^{Filt}$	Cantidad de agua filtrada en cada presa
$W_{ww,c,t}^{Well}$	Cantidad de agua extraída de pozos subterráneos
$WDemand_{c,t}^{Agriculture}$	Demanda de agua dulce de cada municipio para agricultura
$WDemand_{c,t}^D$	Demanda de agua dulce de cada municipio para uso doméstico
$WDemand_{c,t}^I$	Demanda de agua dulce de cada municipio para uso industrial
$WDemand_{c,t}^G$	Demanda de agua dulce de cada municipio para uso en jardinería
$WindS$	Velocidad del viento

Variables

A_c^{HRW}	Área de recolección de colectores pluviales
A^{rotor}	Área del rotor del aerogenerador
A_c^{SP}	Área del panel solar
AR	Recarga artificial de presas
Cap^{MSW}	Capacidad de residuos sólidos
Cap_g^{TGW}	Capacidad de cada planta de tratamiento
Cap_c^{RWSS}	Capacidad del sistema de almacenamiento de agua pluvial
Cap_{ww}^{Well}	Capacidad de extracción de agua subterránea
$CapCost^{AG}$	Costos de capital para aerogeneradores

$CapCost^{HRW}$	Costos de capital para colectores pluviales
$CapCost^{SP}$	Costos de capital para paneles solares
$E-2_r$	Accesibilidad de energía
$E-1_r$	Disponibilidad de energía
$E-3_r$	Sostenibilidad de energía
$E_{c,t}^{AG}$	Energía eólica total generada
$E_{c,t}^{AG-D}$	Energía eólica enviada para uso doméstico
$E_{c,t}^{AG-I}$	Energía eólica enviada para uso industrial
$E_{c,t}^{AG-SL}$	Energía eólica enviada para uso en alumbrado público
E_t^{Biogas}	Energía total obtenida de la planta de Biogás
$E_{c,t}^{Biogas-SL}$	Energía a partir de Biogás enviada para uso de alumbrado público
$E_t^{Biogas-SW}$	Energía a partir de Biogás enviada para uso en el sistema metropolitano de transporte colectivo (metro)
$E_{c=12,t}^{E-AG}$	Energía generada a través de generadores existentes
$E_{c,t}^{NF-AG}$	Energía generada en los aerogeneradores existentes.
$E_{p,t}^{PP}$	Energía generada en las centrales eléctricas

$E_{c,t}^{PP-Cattle}$	Energía requerida para uso en ganadería
$E_{c,t}^{PP-Pumping}$	Energía requerida para uso en bombeo
$E_{c,t}^{RE}$	Energía total por medio de fuentes renovables
$E_{c,t}^{SP}$	Electricidad producida por paneles solares
$E_{c,t}^{SP-D}$	Energía solar destinada para uso doméstico
$E_{c,t}^{SP-I}$	Energía solar destinada para uso industrial
$F - 2_r$	Accesibilidad de Alimentos
$F - 1_r$	Disponibilidad de Alimentos
$F - 3_r$	Sostenibilidad de Alimentos
$FreshW_{d,c,t}^{Dam-D}$	Agua enviada de la presa para uso doméstico
$FreshW_{d,c,t}^{Dam-G}$	Agua enviada de la presa para uso de jardinería
$FreshW_{d,c,t}^{Dam-I}$	Agua enviada de la presa para uso industrial
$Fuel_p$	Cantidad de combustible utilizado
$GHGE^{PP}$	Emisiones de gases de efecto invernadero generadas en las centrales eléctricas
$GHGE^{Biogas}$	Emisiones de gases de efecto invernadero generadas en la planta de Biogás
$MSW_{c,t}$	Cantidad de residuos sólidos recolectados

$NumbAG_{c=12}$	Número de aerogeneradores existentes
$OMCost^{AG}$	Costo de operación y mantenimiento de aerogeneradores
$OMCost^{Biogas}$	Costo de operación y mantenimiento de planta de biogás
$OMCost^{HRW}$	Costo de operación y mantenimiento del sistema de almacenamiento de colector pluvial
$OMCost^{PP}$	Costo de operación y mantenimiento de centrales eléctrica
$OMCost^{SP}$	Costo de operación y mantenimiento de paneles solares
$OMCost^{TGW}$	Costo de operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas grises
$PumpingCost$	Costo por bombeo de agua
$SPILLWAY_{d,t}$	Descarga de agua a través de vertederos de cada presa
TAC	Costo total anual
$TotCapCost$	Costos de capital total
$TotEC$	Capacidad total de energía
$TotEFoodDC$	Energía total consumida
$TotEFoodDC$	Cantidad total de alimentos consumidos
$TotGHGE$	Emisiones totales de gases de efecto invernadero
$TotOptCost$	Costo total de operación y mantenimiento
$TotWFresh$	Consumo total de agua dulce
$TotWFoot$	Cantidad total de agua consumida por la población
$TotWG$	Total de agua generada

$TotFreshW^{Dam}$	Total de agua consumida de las presas
$W - 2_r$	Accesibilidad de agua
$W - 1_r$	Disponibilidad de agua
$W - 3_r$	Sostenibilidad de agua
$W_{d,t}^{Dam}$	Total de agua almacenada en cada una de las presas
$W_{d,t-1}^{Dam}$	Cantidad de agua almacenada al final del período de tiempo anterior
$W_{c,t}^{D-BW}$	Total de aguas negras generadas
W_t^{D-GW}	Total de aguas gris generadas
$W_{c,t}^{HRSS}$	Sistema total de almacenamiento de agua pluvial
$W_{c,t}^{HRW}$	Cantidad de agua de lluvia cosechada
$W_{c,t}^{HRW-D}$	Agua pluvial enviada del sistema para uso doméstico
$W_{c,t}^{HRW-G}$	Agua pluvial enviada del sistema para uso de jardinería
$W_{c,t}^{HRW-I}$	Agua pluvial enviada del sistema para uso industrial
$W_{d,t}^{ID}$	Cantidad de agua destinada al distrito de riego
$W_{d,t}^{RF-Dam}$	Cantidad de agua pluvial recolectada en las presas
$W_{c,t}^{TBW}$	Total de aguas negras tratadas

W_t^{TGW}	Total de aguas gris tratadas
$W_{g,c,t}^{TGW-G}$	Aguas tratadas enviadas para uso jardinería
$W_{c,t}^{TGW-I}$	Aguas tratadas enviadas para uso industrial
$W_{ww,c,t}^{Well}$	Cantidad de agua subterránea extraída
$W_{ww,c,t}^{Well-D}$	Agua subterránea extraída para uso doméstico
$W_{ww,c,t}^{Well-G}$	Agua subterránea extraída para jardinería
$W_{ww,c,t}^{Well-I}$	Agua subterránea extraída para industria

Variables Binarias

y_c^{AG}	Variable binaria correspondiente a aerogeneradores
y_c^{HRW}	Variable binaria correspondiente a colectores pluviales
y_c^{MSW}	Variable binaria correspondiente a residuos sólidos
y_p^{PP}	Variable binaria correspondiente a centrales eléctricas
y_c^{RWSS}	Variable binaria correspondiente a tanque de almacenamiento se determina con el uso de la variable binaria
y_g^{TGW}	Variable binaria correspondiente a planta tratadora de aguas grises
y_{ww}^{Well}	Variable binaria correspondiente a pozos subterránea

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su apoyo incondicional y motivación de seguir adelante.

A mi asesor y compañeros de trabajo, por su confianza y aportación durante todo el trabajo de investigación.

A Conacyt por la aportación financiera.

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

1.2 ANTECEDENTES

1.3 OBJETIVOS

1.4 JUSTIFICACIÓN

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.6 HIPÓTESIS

1.7 CASO DE ESTUDIO

1.1 GENERALIDADES

Los efectos de cambio climático son resultado del manejo incorrecto de los recursos vitales para la sostenibilidad del ecosistema. La crisis ambiental, especialmente la imposibilidad de abordar el cambio climático, es el mayor desafío existencial de la humanidad y de mayor impacto que el mundo entero enfrentará la próxima década (WEF, 2019). El incremento de temperatura media global ha sido notable drásticamente. Comparado con 1990, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2007) dio a conocer un incremento en la temperatura media global de 1-3°C. Con lo anterior, el deshielo de los polos es un suceso inevitable, por lo que los niveles de los océanos se han elevado (IPCC, 2018) con estimaciones alarmantes para 2065. La vulnerabilidad al cambio climático es crítica, presenta nuevos y complejos desafíos para la población (Eboli et al., 2010), las inundaciones y sequías cada vez son más extremas, en donde diversas economías nacionales son afectadas debido al cambio climático (Tol RSJ, 2009). De acuerdo con información científica (IPCC, 2007), se esperan pérdidas del 1-5% de PIB para un incremento de 4°C en la temperatura media global. La ubicación geográfica, la disponibilidad de recursos naturales y el sistema de producción juegan un papel importante en la satisfacción de necesidades regionales, así como en el desarrollo de estrategias sostenibles para mitigar la incertidumbre asociada al cambio climático (OCHA, 2020).

Otros efectos debido al cambio climático se están haciendo presentes con mayor intensidad en nuestra vida cotidiana, ante la falta de líquido indispensable (NU, 2018) y afectaciones sobre la salud humana (OMS, 2018). La crisis hídrica es uno de los mayores riesgos que se tratan de prever para el futuro. En México, se ha creado el Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE, 2019) que propone buscar planes y acciones sobre la gestión del agua, minimizando impactos ambientales, económicos y sociales; también se ha creado el Programa Nacional Contra Contingencias Hídricas (PRONACCH, 2019) que pretende hacer conciencia sobre el uso del recurso hídrico, así como diferentes fuentes de obtención del mismo; definiendo el agua como un recurso estratégico en todo el mundo. De forma generalizada, el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6 es garantizar la disponibilidad de agua y el saneamiento (ODS, 2015).

Diversos estudios avalan resultados sobre el cambio climático, reduciendo el consumo de agua por persona y disminuyendo el consumo de energía, implementando esquemas sobre la gestión doméstica (Eakin, et al., 2007). Aunque se ha intentado lograr un desarrollo sostenible sobre el agua involucrando diferentes aspectos sobre estrategias y prevención del riesgo de sequía y comprender el urbanismo, aún estamos lejos de obtener sistemas eficientes para largo plazo (Aguilar-Barajas et al., 2016). Por ejemplo, en áreas áridas o semiáridas, la necesidad de desarrollar sistemas de recursos resilientes se magnifica debido a la alta probabilidad de sufrir desastres naturales (CAF, 2018). Además, se conoce que, a nivel mundial, más del 80% de las aguas residuales generadas por la sociedad regresan al ecosistema sin haber sido tratadas o reutilizadas (UNESCO, 2017). Por otro lado, respecto al sector energético la Comisión para la Transición Energética de Estados Unidos, a finales del 2018 dio a conocer un informe donde asegura que es posible mitigar las emisiones de dióxido de carbono con un costo menor de 0.5% de PIB mundial, a través de diferentes técnicas de descarbonización (Energy Transitions Commission, 2018).

Muchos lugares han puesto gran interés en solucionar como abastecer insumos con la implementación de sistemas de energía y agua interconectados apoyando la mitigación del cambio climático (Semiat, 2018) analizando aspectos económicos, ambientales y sociales. Se pueden realizar acciones para mitigar el calentamiento global, las cuales incluyen inversiones eficientes en medios de transporte, generación de electricidad, viviendas sustentables, mejor gestión de residuos industriales y municipales. Es importante mencionar que para lograr un verdadero cambio se deben crear soluciones que combinen diferentes medidas como las anteriores, asegurando la preservación de los recursos naturales para las generaciones futuras, la seguridad del medio ambiente se relaciona a través de vínculos entre sus participantes.

1.2 ANTECEDENTES

La necesidad de adaptación de escenarios sobre la disponibilidad de agua es de mayor relevancia sobre futuros cambios climáticos (Eakin et al., 2007). La falta del recurso hídrico aumenta la demanda de energía, debido a la dependencia para la producción del recurso energético (Craig-Coope, 2012). En 2016 se analizó la gestión de riesgo para la sequía meteorológica, incluyendo además la vulnerabilidad de diversos sectores (Magaña, 2016). Además, en lugares donde ya existe una sobreexplotación de recursos naturales, como el agua, la recolección y uso de agua pluvial puede cubrir algunas demandas de suministro del líquido indispensable y permitir la recuperación de pozos profundos que están en proceso de agotamiento (Pérez-Uresti et al., 2018), y disminuye el riesgo a inundaciones (Carmen-Valdez et al., 2016). Por consiguiente, mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos e introducir medidas para su conservación puede reducir de forma significativa el consumo de energía e incrementar la disponibilidad de alimentos. La necesidad por cubrir las demandas hídricas conlleva a hacer uso de diferentes técnicas para obtención de agua dulce, que anteriormente no se tomaban en consideración por los altos costos de operación que generan. La desalinización de agua de mar es un proceso cada vez más utilizado alrededor del mundo para la producción de agua dulce; en donde la principal limitante radica en el alto consumo de energía (Semiat, 2018) así como la inmensa cantidad de salmuera enviada al mar (UNU-INWEH, 2019), razón por la cual las mayores plantas se encuentran en países ricos en recursos energéticos como Arabia Saudita.

Con el paso del tiempo, la población incrementa, y con ello, de forma proporcional, la demanda de insumos. Los gobiernos del mundo entero han puesto gran interés en solucionar como abastecer estos insumos. Por ejemplo, con la implementación de un sistema de energía y agua interconectados apoyando la mitigación del cambio climático (Fulton y Cooley, 2015), analizando aspectos económicos, ambientales como emisiones de dióxido de carbono y sociales (González-Bravo et al., 2016). El efecto sobre el suelo ante la necesidad de proveer productos agrícolas también ha sido estudiado (González-Bravo et al., 2018). Adicionando el cultivo de alimentos y ganado, así como un sistema de poligeneración, Cansion-Loeza y Ponce-Ortega (2018) reportaron un modelo que permite satisfacer las demandas de energía, agua y alimentos a una comunidad aislada de bajos recursos. Hacia un

desarrollo sostenible, la seguridad del medio ambiente relaciona la distancia entre oferta y demanda en los recursos naturales (Biggs et al., 2015). En un proceso sostenible, en donde se involucran diferentes áreas e incertidumbre de datos, (Moradi-Aliabadi y Huang, 2016) así como del mismo proceso; la optimización resulta ser muy complicada sobre la búsqueda de solución. Mostrando fiabilidad en sus resultados, autores hacen uso de diferentes técnicas de optimización de carácter deterministas y técnicas metaheurísticas (Ponce-Ortega y Hernández-Pérez, 2019), para solucionar problemas complejos que hoy enfrenta el mundo.

Se considera que la importancia de Nexo Agua-Energía-Alimentos (WEF, por sus siglas en Inglés) radica en los efectos ambientales (Bazilian et al., 2011) (**Figura 1.1**), en comprender la naturaleza de los problemas de recursos (Zhang et al., 2018), así como la dependencia de aspectos económicos y sociales (Weitz et al., 2017). La cuestión de la gobernanza con la modelización del concepto de nexo WEF ofrece la capacidad de gestionar las relaciones de los sectores involucrados y analizarlos desde una perspectiva de seguridad (Harwood, 2018), permitiendo la comparación de factores de producción debido a choques climáticos (Piontek et al., 2018). Ante la crisis hídrica, energética y alimentaria, la seguridad del Nexo Agua-Energía-Alimentos (WEF) nunca había tomado mayor interés. De forma general, la seguridad del agua se relaciona entre cantidad y calidad para un acceso adecuado (Naciones Unidas IHP-VIII). La seguridad energética asegura el acceso a diferentes fuentes de energía y a todos los combustibles, promoviendo el uso de tecnologías renovables (Gasser, 2020). Finalmente, la seguridad alimentaria se define por La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2010) y se plantea como el acceso de alimentos necesarios para la población y cumplir una dieta nutritiva que lleve a una vida sana, permitiendo identificar la vulnerabilidad entre de los sectores.

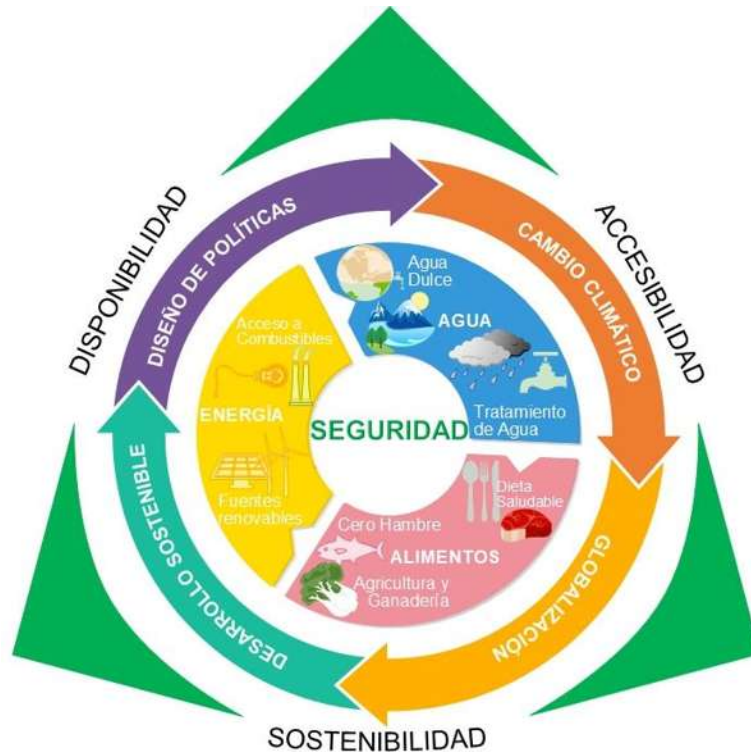


Figura 1.1 Interacciones Entre los Sectores Involucrados en el Nexa WEF.

Una nueva política de seguridad del nexo WEF demanda grandes desafíos multidisciplinares (Scanlon et al., 2017) y transdisciplinares para el desarrollo sostenible (Kurian, 2017), promoviendo inversiones que equilibren los beneficios en los diferentes sectores (Ringler et al., 2013). Un factor importante para el análisis de seguridad son las escalas espaciales orientadas a políticas (Bijl et al., 2018), lo que implica que un concepto de nexo se puede aplicar en diferentes niveles (local, municipal, regional y nacional). Sin embargo, el concepto de seguridad del WEF se analiza con una perspectiva de servicios de red y ecosistema, identificando fallas de sustentabilidad (PahlWostl, 2017), así como el análisis de rutas de la cadena de suministro que inducen el vínculo e identificación de los sectores de consumo (Shi et al., 2019).

La cuantificación de la seguridad del agua, energía y alimentos presenta importantes desafíos, el principal es la disponibilidad de datos necesarios para realizar el análisis diseñado. La investigación se basa en un modelo socioeconómico que presenta relaciones de oferta/demanda y controles ambientales (Zhang y Vesselinov, 2017). Asimismo, se ha

considerado la teoría input-output y el consumo total de los tres sectores (Karnib y Alameh, 2020), y se ha abordado la inclusión de diagramas para componer índices clave por sector (Mahlknecht et al., 2019). En respuesta a las condiciones climáticas, se han creado indicadores de confiabilidad, recuperación máxima y pérdida total de generación de energía en las cuencas hidrográficas durante el tiempo seco (Mu et al., 2020). Liang et al. (2018) presentaron un modelo específico y estandarizado para la administración sostenible de los recursos, cuantificando los flujos de materiales y energía. Namany et al. (2019) presentaron una metodología de nexo del WEF para influir en el proceso de toma de decisiones dentro del sector alimentario. Este enfoque consideró tres escenarios, el primero para la situación actual, el segundo considera la autosuficiencia y el tercero incorpora la autosuficiencia de fuentes de energía renovable y no renovable.

Vale la pena señalar que, debido a la importancia de evaluar el nexo del WEF, existe la necesidad de la creación de diferentes indicadores que permitan monitorear y diseñar nuevas políticas, con el objetivo de promover la globalización del desarrollo sostenible. Los primeros intentos por cuantificar la Seguridad del Nexo se dirigían en comprenderlo conceptualmente (Wicaksono et al., 2017); y de forma secuencial el monitoreo (Saladini et al., 2018) y análisis por separado cada uno de los recursos directos e indirectos que conforman el Nexo (Liang et al., 2020). Algunos otros autores han medido la brecha entre oferta y demanda de los insumos (Fuentes-Cortés y Ponce-Ortega, 2017), impactos ambientales enfatizando en el ciclo de vida (Mannan et al., 2018) y desarrollando de diseños sostenibles (Giupponi y Gain, 2016) con enfoque de optimización y simulación. Si bien, cuantificar el daño por separado de cada uno de los sectores del Nexo ayudaba, esto no permitía tener un panorama completo de los vínculos entre los participantes, siendo necesario analizar el Nexo como un sólo sistema (Cansino-Loeza et al., 2020). En este sentido, los indicadores han sido abordados de diferente manera, se ha propuesto un indicador que vincula la disponibilidad de agua, energía y alimentos (LIFEWAY) midiendo los logros de sostenibilidad de un país asociado con el Producto Interno Bruto (PIB) (Yuan y Lo, 2019). También existen indicadores que miden el desempeño de la utilización y gestión de los recursos hídricos, energéticos y alimentarios, para seguimiento y la evaluación del Nexo como tal (Nhamo et al., 2019). Otros más, se enfocan en indicadores existentes midiendo flujos de recursos, cuantificación de impactos ambientales y aspectos de eficiencia (Arthur

et al., 2019). Integrando diferentes indicadores Mahlknecht et al. (2019) desarrollaron Índices de Seguridad del Nexo WEF, los cuales permiten realizar un análisis de los sectores agua, energía y alimentos abordando disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de una región.

No obstante, debido a la complejidad que representa un sistema multiobjetivo; la optimización de la Seguridad del Nexo WEF se ha centrado en medir la sostenibilidad fuerte y débil (Yi et al., 2020), la sinergia y entropía del sistema (Zhang et al., 2020) y la teoría insumo/producto (Karnib, 2018); dejando un gran punto de arranque en el campo de investigación hacia el desarrollo sostenible de una región altamente urbanizada y con condiciones climáticas áridas/semiáridas que aborde cuantitativamente este problema.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un estudio basado en optimización multiobjetivo que permita determinar escenarios factibles para satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos, logrando seguridad entre los involucrados en el Nexo WEF en una región semiárida cuantificando aspectos económicos, ambientales y la resiliencia ante efectos de las catástrofes naturales de sequías e inundaciones exacerbados por el cambio climático.

1.3.2 Objetivos Particulares

- Desarrollar una plataforma de optimización general que permita simular y optimizar el sistema interconectado de una región semiárida para satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos.
- Analizar el caso específico de la región del Área Metropolitana de Monterrey y proponer alternativas para satisfacer sus necesidades para usos doméstico, industrial, de jardinería y agricultura a corto y mediano plazo.
- Cuantificar la Seguridad Hídrica, Energética y Alimentaria e identificar y plantear posibles nuevas políticas que mejoren el estado actual de los recursos.
- Maximizar la Seguridad del Nexo WEF como un sólo sistema, analizando impactos ambientales y económicos.
- Incorporar escenarios que permitan enfrentar los efectos del cambio climático a través de soluciones resilientes al problema.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Debido a los drásticos cambios climáticos que actualmente sufre el planeta por el calentamiento global, las sequías e inundaciones son cada vez más frecuentes. Por lo anterior, en lugares donde existe un clima semiárido debido a la ubicación geográfica y además están expuestos a catástrofes naturales, la disponibilidad de agua dulce se ve afectada dañando la generación de energía, así como la disponibilidad de alimentos. La necesidad de adaptación de un sistema interconectado de agua y energía, que involucre diferentes formas de generación de energía, tratamiento de aguas residuales, diferentes formas de obtención de agua fresca y recolección de agua pluvial, a bajo costo y cuidando las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera se intensifica. La distribución y el correcto manejo de los recursos naturales pueden ayudar significativamente a mejorar la situación actual que sufre todo el mundo por el desabasto de recursos naturales y los efectos exacerbados por el cambio climático, principalmente en regiones semiáridas con un alto nivel de urbanización. Un análisis de esta magnitud requiere de un análisis multidisciplinario para lograr satisfacer las demandas de una población; además el uso de herramientas de optimización multiobjetivo para simular y solucionar problemas de la vida cotidiana permite abordar el problema y visualizar posibles soluciones sin necesidad de poner en riesgo a inversionistas que deseen llevar a cabo el estudio. Ante esto, se requiere diseñar e implementar nuevas políticas sobre los sectores que conforman el Nexo WEF para ofrecer una buena y duradera calidad de vida a la población y que los tomadores de decisiones puedan cuantificar la Seguridad del Nexo WEF por lo cual, se han creado Índices de Seguridad hacia un desarrollo sostenible y preservar los recursos naturales con beneficio de las generaciones futuras sin comprometer a las actuales. En este trabajo se identifica las interacciones que existen en el Nexo Agua-Energía-Alimentos evaluado como un sólo sistema de optimización para maximizar la Seguridad Hídrica, Energética y Alimentaria midiendo disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de cada recurso, sin dejar atrás el monitoreo económico. A través de este enfoque se plantea la inserción de estrategias que permitan satisfacer las demandas de agua y energía para el estado de Nuevo León en México con énfasis en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM). (Ver **Figura 1.2**)

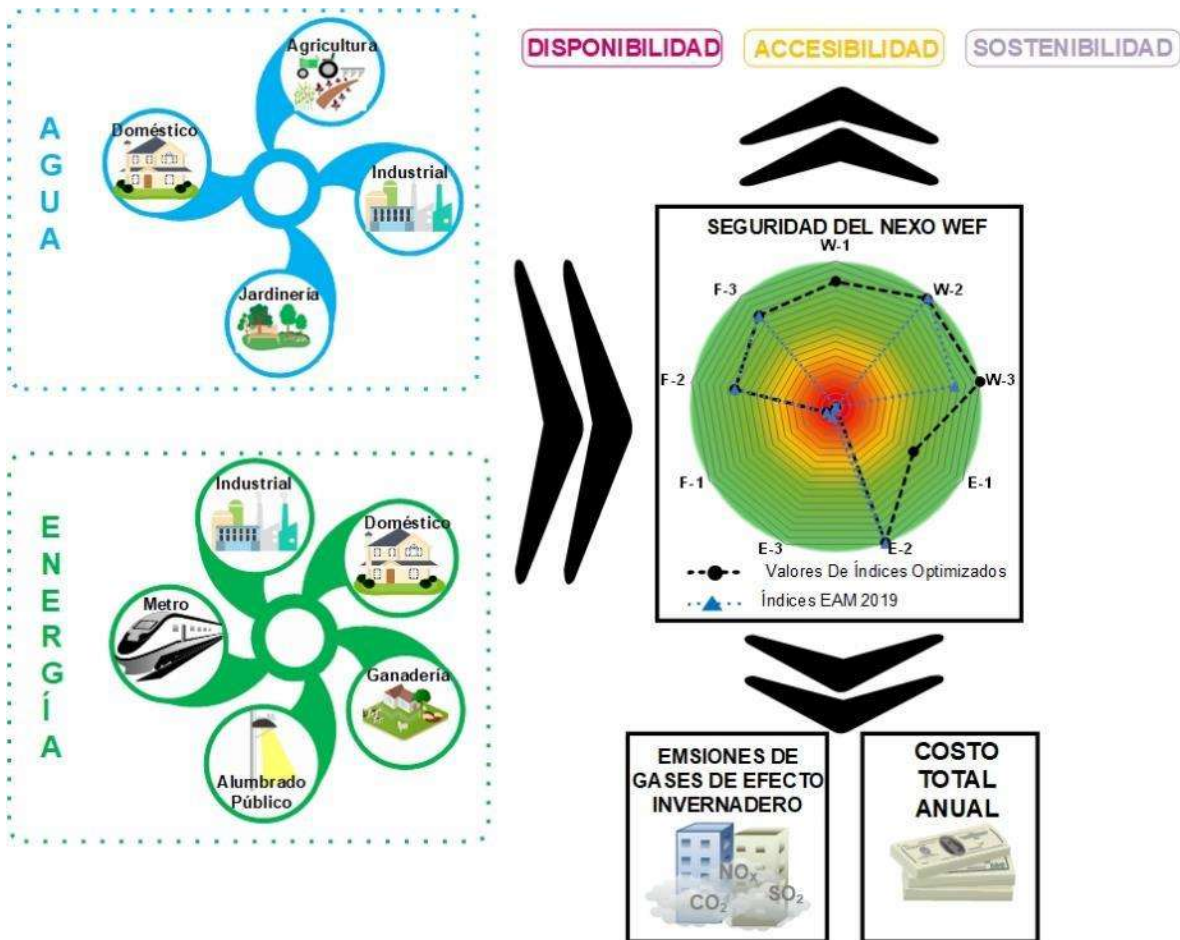


Figura 1.2 Descripción Esquemática de la Justificación.

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La globalización permite la integración de mercados y transferencias de inversión, apuntando a la mejora de las economías nacionales. Por otro lado, la globalización también depende de la importación de productos y servicios de una región o país a otro. La satisfacción de las necesidades de agua, energía y alimentos es de suma importancia para una sociedad. Particularmente, las regiones en climas con escasez de agua están luchando enormemente por encontrar formas de cubrir sus necesidades de recursos. Por lo tanto, cuantificar la seguridad del WEF es de importancia para esas regiones, y debe darse prioridad a proporcionar un enfoque adecuado para evaluar la seguridad de los recursos en las regiones áridas y semiáridas.

Para mostrar fiabilidad al modelo de optimización MINLP propuesto y los resultados obtenidos en este trabajo, se plantea la aplicación como caso de estudio el estado Nuevo León en el noreste de México, destacando el área metropolitana de Monterrey (aproximadamente 5 millones de habitantes) donde el clima es semiárido, exponiendo a la población a riesgos de pérdida de recursos. Cabe señalar que esta es una de las áreas geográficas más importantes en términos de contribución al Producto Interno Bruto (PIB) mexicano (SET-NL, 2018). Por lo tanto, se pretende analizar la seguridad del WEF utilizando un esquema de índice compuesto que permita caracterizar el estado actual en términos de seguridad del WEF y hacer una proyección dada la acelerada población y crecimiento económico. Todos los parámetros específicos del AMM necesarios para solucionar el código matemático son obtenidos de páginas gubernamentales como son CONAGUA y SENER. De esta forma conocemos las necesidades que enfrenta el caso de estudio para satisfacer las demandas de servicios a la población y la situación actual de sus recursos. La seguridad de los recursos se evalúa mediante índices de los años 2013, 2015 y 2019 en cuanto a disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad. Se realizan proyecciones para los años 2025 y 2030 para evaluar el desempeño de los índices y proporcionar elementos para el desarrollo de políticas encaminadas a mejorar la seguridad del WEF del nexo.

1.6 HIPÓTESIS

Desarrollar un modelo matemático en la plataforma de optimización GAMS que involucre múltiples partes interesadas permitirá cuantificar la Seguridad Hídrica, Energética y Alimentaria y la vulnerabilidad de una zona con clima semiárido, ante la exposición a catástrofes naturales como son, sequías e inundaciones hidrológicas. La Programación Mixta Entera no Lineal (MINLP, por sus siglas en inglés) incorporará el estudio como un sólo sistema interconectado, permitiendo abastecer en un 100% las demandas de la población sin dejar de lado aspectos económicos y ambientales.

1.7 CASO DE ESTUDIO

1.7.1 Datos Generales Y Clima

El AMM cuenta con 4'106'054 habitantes según el último censo realizado por el INEGI (2017), cuenta con el 88% de la población total de estado de Nuevo León, dando como resultado una densidad de población de 605 habitantes/km². Esta zona está constituida por 13 municipios en los que se encuentran: Apocada, Cadereyta Jiménez, El Carmen, García, San Pedro Garza García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria; san Nicolás de los Garza, Santa Catarina y Santiago. Es una las localidades más desarrolladas del país y concentra una gran cantidad de grupos industriales, siendo la segunda ciudad de México con PIB per cápita de 13'091 dólares en 2015 (INEGI, 2017). Es una región ubicada en el noreste de México, el clima es relativamente seco y extremo, presenta un riesgo de fenómenos hidro-meteorológicos extremos (sequías e inundaciones) y con limitación local de disponibilidad natural de recursos hídricos. Además, lo anterior se empeora con los efectos de Isla de Calor Urbana. En esta zona, el 68% del estado tiene un clima seco y semiseco, y el 20% de esta área es cálido subhúmedo debido a su ubicación geográfica en la planicie costera del norte del Golfo de México (INEGI, 2019) (**Figura 1.3**).



Figura 1.3 Caso de Estudio, Área Metropolitana de Monterrey.

La precipitación promedio estatal es de 650 mm por año, las lluvias ocurren en verano en los meses de agosto y septiembre, la precipitación promedio histórica permite visualizar el clima presente en la región (SEMARNAT, 2019). En la **Tabla 1.1** se muestran las precipitaciones registradas durante el 2019 en las distintas zonas del estado de Nuevo León. De esta manera, en esta zona, el clima es una limitación para el sector agrícola, dañando directamente la seguridad de los alimentos disponibles para satisfacer las necesidades de la población y derivando en una dependencia de los alimentos importados. En un contexto general, la situación de seguridad hídrica, energética y alimentaria del Estado de Nuevo León en México es complicado.

Tabla 1.1 Precipitaciones Para las Distintas Áreas del Estado de Nuevo León (SEDAGRO, 2019).

2019	Mm												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Promedio Histórico
Nuevo León	26.1	3.3	58	1.6	62.6	85.2	43.6	42.5	247.5	29.4	21.8	20.1	602.7
Norte	25.4	2.8	30.6	2.9	103.3	65.9	25.2	37.5	142.9	21	39.2	25.2	538.3
Centro	32.3	2.4	71.7	0.3	42.4	51.8	34.1	50.9	316.5	16.4	22.5	19.9	615.3
Citrícola	29.3	5.7	63.2	2.4	95.5	114.5	52.2	39.4	259.4	49.6	16	16	740
Sur	6.8	3.4	43.7	2.6	19.2	149.5	75.3	44.6	168.2	35.2	14.5	11.3	470.7

1.7.2 Agua

El volumen total de aguas nacionales concesionadas al Estado de Nuevo León para los diferentes usos consuntivos es de 2'092.4 hm³/año, de los cuales: 1'192.7 hm³/año corresponden a aguas superficiales (57%) y el resto, 899.7 hm³/año (43%) a aguas subterráneas (EAM, 2018). Los principales usos consuntivos del agua son: agrícola 1'473.6 hm³/año, abastecimiento público 533.1 hm³/año, industria autoabastecida 85.5 hm³/año y energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad 0.2 hm³/año (CONAGUA, 2018). El agua que se suministra al Área Metropolitana de Monterrey se extrae de dos fuentes: Superficiales un 60% y subterráneas un 40%, tiene un sistema de abastecimiento de agua muy vulnerable, altamente dependiente de la presencia de huracanes para que llenen tres presas que surten a la ciudad. El Área Metropolitana de Monterrey cuenta con un 99.66% de cobertura con servicio de agua potable y el 99.12 % de habitantes cuentan con servicios de drenaje sanitario el equivalente a 1'089'589 descargas (CONAGUA, 2019). La capacidad total de almacenamiento de agua en las tres presas alcanza 1'462.5 Mm³, y más de tres cuartos de este total corresponden a la presa El Cuchillo. De manera general, el balance hidrológico de aguas superficiales en el estado presenta un déficit de 1'568.43 Mm³/año, por lo que, de las 20 cuencas existentes en el Estado, 8 tienen disponibilidad; 5 están en equilibrio y las 7 restantes son deficitarias. De los 30 acuíferos del Estado, 18 tienen disponibilidad, mientras que los 12 restantes son deficitarios, lo que arroja un balance de aguas subterráneas en el estado con un déficit de 20.79 Mm³/año.

La AMM cuenta con tres plantas de tratamiento de aguas residuales, Dulces Nombres (5'000 L/s), Norte (2'500 L/s) y Noreste (500 L/s) (SADM, 2017). A partir de 1995, SADM ha logrado mantener bajo tratamiento el 100% de las aguas residuales generadas en la AMM. El receptor de la mayor parte de las descargas de aguas residuales tratadas del AMM es el río Pesquería. Estas aguas residuales son aptas para uso agrícola y aportan un flujo muy significativo al sistema hidrológico de la cuenca media y baja del Río San Juan. La red de drenaje pluvial del AMM tiene siete grandes sistemas. Entre los que destacan por su capacidad de conducción están los sistemas Obispo, Conductores, Torres de Escobedo, La Talavera y Sabinas. La longitud total de drenes y colectores de aguas pluviales construidos, incluyendo ramales secundarios, es de 160 km, con una capacidad de desalojo de 4.729 m³/s.

1.7.3 Alimentos

El sector alimentario es deficiente e incapaz de satisfacer las necesidades alimentarias de la población. En promedio, la cantidad de energía requerida en una dieta es de 2.900 kcal/día (FAO, 2018). En el Estado de Nuevo León se mantiene una prevalencia de desnutrición del 30% y una prevalencia de obesidad del 30% (CONEVAL, 2018). El patrón general de consumo de alimentos en Nuevo León emitido por la EESNL (2016) consiste en tortilla de maíz, arroz, agua corriente, frijoles, tomates, leche, huevos, pollo, res y queso. La **Figura 1.4** muestra el porcentaje de cada tipo de alimento consumido en Nuevo León. Entre los principales cultivos en todo el estado se encuentran sorgo forrajero, pastos y praderas, nueces y maíz (SIAP, 2018a). La actividad ganadera no satisface la demanda de consumo de carne, leche y huevos (en el caso de las aves). El estado tiene una producción anual total de 231,400 toneladas de carne vacuna y huevos, y 27,200 miles de litros de leche bovina y de cabra, con un valor total de 781,507 millones de dólares, según el cierre ganadero 2018 emitido por SIAP (2018b).

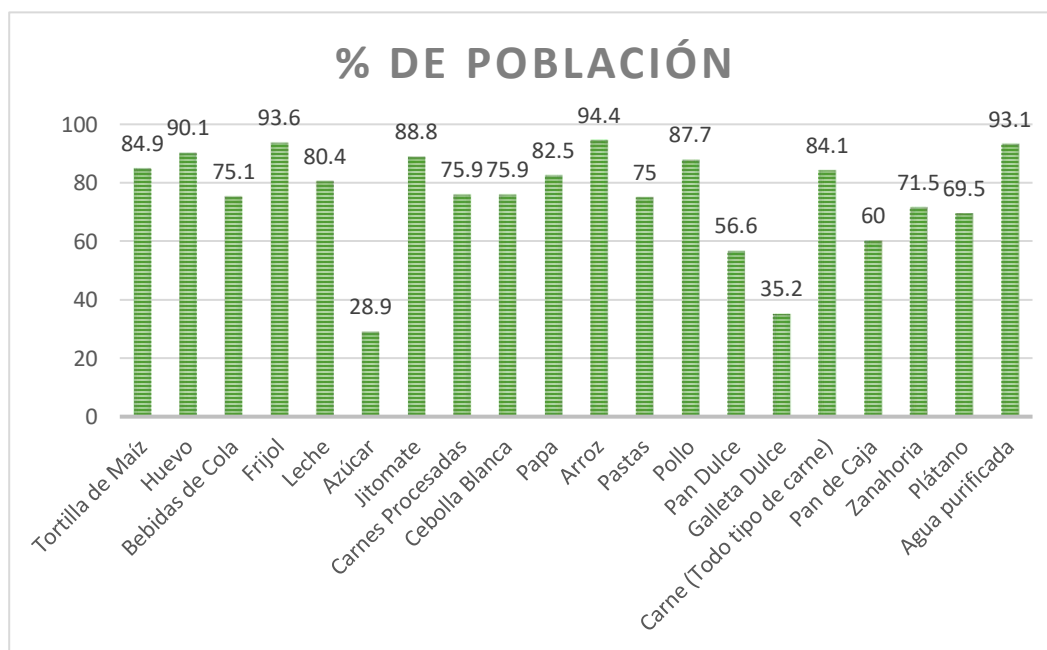


Figura 1.4 Patrón de Consumo de Alimentos en NL (EESNL, 2016).

1.7.4 Agricultura

En la agricultura se practica de tipo temporal y de riego, la primera se apuesta a la época de lluvias y la segunda se tiene que proporcionar grandes cantidades de agua al cultivo por medio de aspersores, canales o acequias. Entre los principales cultivos en todo el estado se encuentran sorgo forrajero, pastos y pradera, nuez y maíz palomero, la información de cada cultivo por municipio, ciclo productivo, modalidad, superficie sembrada y cosechada; así como la superficie de la cual no se obtuvo producción debido a que se perdió por alguna causa, en Nuevo León y Área Metropolitana de Monterrey, se puede encontrar en el “CIERRE AGRÍCOLA 2018”. Específicamente en el AMM, el 97% de la producción agricultora son pastos y pradera, 2% sorgo forrajero y 1% (Nuez, Aguacate, Ciruela, Durazno, Manzana, Naranja y Maíz grano) (SIAP, 2018a). Por otro lado, en cuanto a superficie sembrada en el AMM, el mayor porcentaje pertenece a cultivos de pastos y praderas con un 92%, seguido de nuez 5%, 1% sorgo forrajero, 1% Manzanas y 1% de otros cultivos en menor proporción como Aguacate, Ciruela, Durazno, Naranja, Maíz grano y Uva (SIAP, 2018a). De la superficie cosechada en el AMM, el 92% corresponde a pastos y praderas, 5% Nuez, 1% de Sorgo forrajero, 1% Manzana y el 1% restante que corresponde a cultivos como Aguacate, Ciruela, Durazno, Naranja, Maíz Grano, Avena Forrajera y Uva (SIAP, 2018a).

1.7.5 Ganadería

Esta actividad destaca en la crianza y comercio de ganado vacuno, además de que la producción de carne satisface una parte de la demanda local. Las regiones ganaderas con mayor influencia están ubicadas en la parte norte y centro del estado. Generalmente existen dos formas en que se mide la producción pecuaria en México; en pie y en canal. Estas dos medidas se aplican para la producción de ganado en general, esto es, para todo aquel animal mamífero que es criado para la producción de carne y sus derivados para la alimentación humana. La producción de ganado en pie se refiere al animal finalizado (vivo), que se sacrifica para abasto. A diferencia de la producción de ganado en canal, misma que se obtiene después de faenado el animal. La producción pecuaria del AMM constituida 35% Caprino, 25% Bovino, 25% Ovino, 8% Porcino y 6% Ave, con valor de hasta \$ 130'356'202 USD, según el cierre pecuario 2018 emitido por la SIAP (2018). Cada especie se divide en ciertos productos como son Carne, Ganado en Pie, Leche y Huevo, para el AMM el 33.94% de

Bovino corresponde a carne, 47.49% ganado en pie y 18.57% leche. Caprino sus productos son 7.58% carne, 14.23% ganado en pie y 78.19% leche. Porcino, 44.3% carne y 55.7% ganado en pie. Ovino, 34.6% carne y 65.4% ganado en pie. Finalmente, los productos de Aves son 43.49% ganado en pie, 33.68% carne y 21.83% huevo (SIAP, 2018b).

1.7.6 Energía

Nuevo León es el estado con mayor consumo de electricidad de todo el país, representa el 8.5% del consumo nacional, seguido de la Ciudad de México con 6.6%; el consumo de gas sigue una tendencia similar dada la magnitud de la industria neoleonesa como cuarto productor a nivel nacional (SENER, 2019). Esta información es un elemento fundamental para asumir un rol activo en el desarrollo del sector a fin de asegurar un adecuado aprovisionamiento y conversión energética que impacte positivamente en la actividad industrial del estado, tomando en cuenta que el consumo de energía eléctrica se duplicará en los próximos 10 años, derivado del crecimiento del sector comercial que registrará una tasa mayor del crecimiento medio anual durante este periodo, seguido por el sector de servicios. En la región NORESTE existen 6 interconexiones transfronterizas de las cuales 2 son de emergencia y las otras 4 son permanentes. De acuerdo con datos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2018), los usuarios de energía eléctrica en Nuevo León en 2019 fueron 1'926'892 de los cuales el 89.7% son del sector doméstico, 9.66% del sector industrial y servicios, 0.37% de alumbrado público, 0.23% del sector agrícola y el resto por bombeo de agua potable y aguas negras. El consumo de energía eléctrica en Nuevo León, de acuerdo con los datos reportados por la (CFE), en 2018 fue de 17'141.52 GWh, el consumo por sector corresponde a 72.3% al sector industrial y de servicios, 25.73% al doméstico, 1.1% al alumbrado público, 0.7% al uso agrícola y 0.17% al bombeo de aguas potables y negras (**Figura 1.5**).

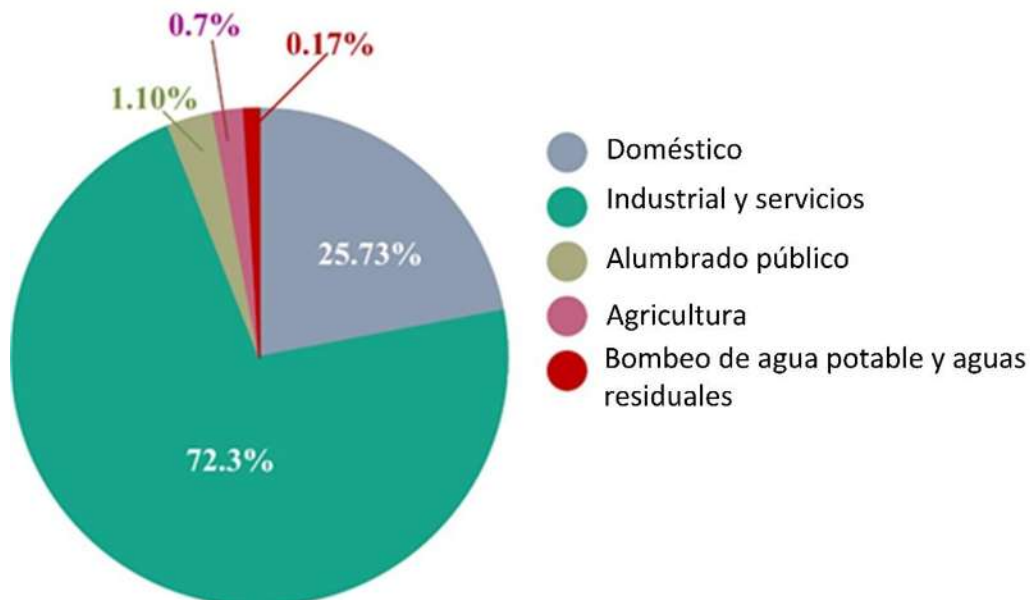


Figura 1.5 Porcentaje de Consumo Eléctrico por Sector en el Estado de Nuevo León.

De acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico (PRODESEN 2018-2032), la región NORESTE cuenta con 10 regiones de transmisión las cuales son: Río Escondido, Nuevo Laredo, Reynosa, Matamoros, Monterrey, Saltillo, Valles, Huasteca, Tomazunchale y Güemez. Para la zona de Monterrey existen 4 líneas de transmisión (CFE, 2019). En 2018 fueron reportadas 43 centrales eléctricas en el estado de Nuevo León de acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico (PRODESEN 2018-2032), de las cuales 8 son de ciclo combinado, 10 de turbogás, 13 de combustión interna, 3 eólicas, 3 de bioenergía y 4 de cogeneración eficiente. La producción bruta (GWh) en 2019 por las 43 centrales eléctricas existentes en Nuevo León fue de 24'239, siendo la tecnología de producción de ciclo combinado la más importante ya que aporta el 90% de la producción de energía eléctrica en el estado (**Figura 1.6**).

La Gerencia Regional de Transmisión Noreste (GRTNE) a través de sus cinco Zonas de Transmisión ubicadas en los estados de Nuevo León, Coahuila y parte de Tamaulipas, tiene bajo su responsabilidad operativa 46 subestaciones eléctricas, las cuales funcionan con voltajes de 400, 230, 138, y 115 kV. Estas instalaciones albergan 1'467 interruptores, bancos de transformación y equipo afín con una potencia total de 26'746 MVA, 5'254 cuchillas, 7'350 transformadores de instrumento y más de 6'000 kilómetros de líneas de transmisión. Toda esta infraestructura sirve para suministrar energía al área noreste del país, transferir

energía a otras regiones, servir de enlace y punto de interconexión de Centrales Eléctricas (CE), además de integrar enlaces de fibra óptica para la operación y control del sistema eléctrico (CFE, 2018).

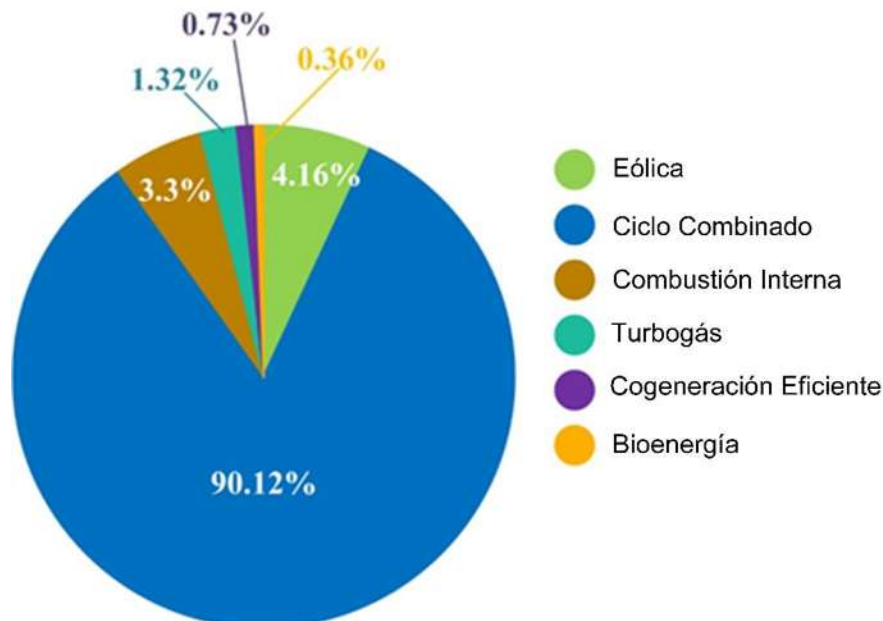


Figura 1.6 Porcentaje de Producción Eléctrica por Tecnología en el Estado de Nuevo León.

Dentro del ámbito de operación de la GRTNE se encuentra la red eléctrica de 115 kV del AMM, la cual abarca gran parte de la extensión territorial del estado de Nuevo León, representa el mayor centro de consumo de energía eléctrica del Norte del país y es una de las regiones de mayor densidad de carga eléctrica de todo el sistema eléctrico nacional. La red eléctrica en 115 kV del AMM cuenta con un gran mallado que interconecta tanto a las SE de 400/115 y 230/115 kV como a las Centrales Eléctricas en 115 kV, lo cual proporciona un amplio margen de maniobra que se traduce en confiabilidad para el manejo de flujos de potencia activa en la red, tanto en condiciones de red completa como ante las contingencias más severas.

La **Figura 1.7** muestra los flujos de alimentos de entradas y salidas para el Estado de Nuevo León. Esta figura nos permitirá poner en contexto el problema de la AMM

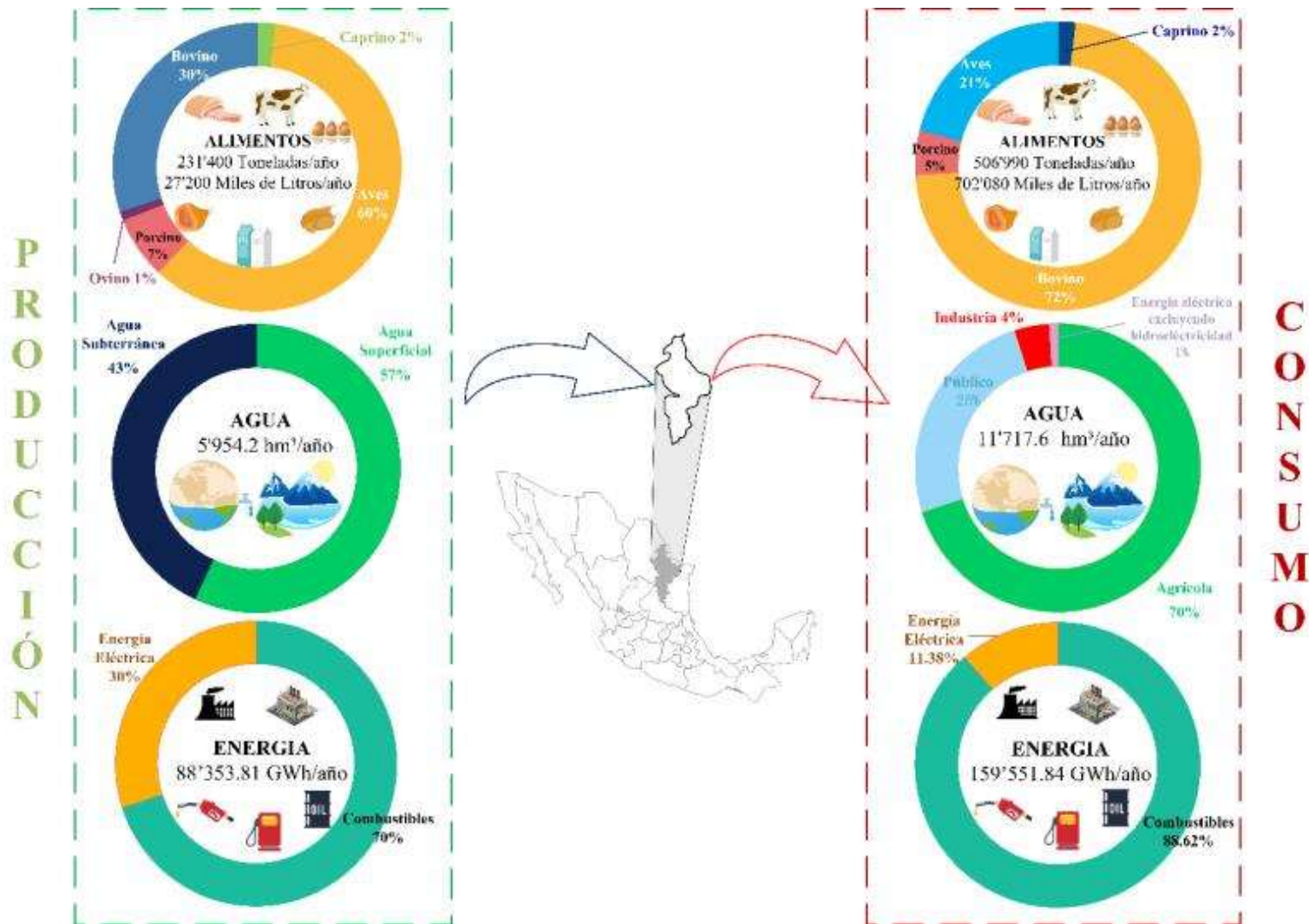


Figura 1.7 Flujos de Agua, Energía y Alimentos en el Estado de Nuevo León.

Capítulo 2 MARCO TEÓRICO

2.1 NEXO AGUA-ENERGÍA ALIMENTOS

2.2 ISLAS DE RECURSOS URBANOS

2.3 ISLA DE CALOR URBANO

2.4 CATÁSTROFES NATURALES (SEQUÍA E INUNDACIONES)

2.5 RESILIENCIA

2.6 OPTIMIZACIÓN

2.7 PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

2.1 NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

Como ya se había mencionado, agua, energía y alimentos son sectores sumamente interconectados (Hoff, 2011). La base del nexo es un intento de equilibrar diferentes usos de recursos ecosistémicos (energía, agua, suelo y factores socioeconómicos) asegurando la sostenibilidad del medio ambiente y la calidad de vida de la población. El concepto del nexo surge a partir del agua como punto de entrada para la aplicación del enfoque; Bellfield en 2015 menciona “El agua da soporte a la seguridad energética y a la seguridad alimentaria. El agua es también vulnerable al cambio climático y a la degradación ambiental”.

La dependencia que existe entre estos sectores gira en torno a cuestiones elementales como son los sistemas de gestión de agua y de infraestructuras, o la energía sostenible y la eficiencia de los sistemas. La eficiencia en el uso de los recursos hídricos en el sector energético difiere en función de la tecnología que se emplee para generar la energía (energía geotérmica, solar, nuclear, gas, carbón, planta de vapor fósil). La energía hidroeléctrica suministra alrededor del 20% de la electricidad mundial y sigue siendo la fuente de energía comercial renovable más importante y económica en todo el mundo. Se conoce que, a nivel mundial, para producir 1 litro de biocombustible líquido, se requiere un promedio de alrededor de 2500 litros de agua (NU, 2012). En la **Figura 2.1** se puede observar interacciones de diferentes elementos del nexo.

El Consejo Mundial de Energía para la Sustentabilidad Energética (WECSE, 2014), ha enfatizado en la creencia que la humanidad tiene todos los recursos, de modo que no existen malas tecnologías, sino sólo decisiones y prácticas poco meditadas. En este contexto se desarrolló el concepto “Trilema energético”, afrontando el desafío de obtener energía de una forma segura, asequible y respetuoso con el medio ambiente. Teniendo en cuenta la presión del cambio climático y el aumento de demandas de la población, es de suma importancia tomar en cuenta el nexo agua-energía-alimentos para lograr metas económicas, ambientales y sociales (Bellfield, 2015). Nuevos retos afectarán tanto a los recursos hídricos como al sector energético, y estos a su vez la producción de alimentos. La causa más evidente de ello es el cambio climático.

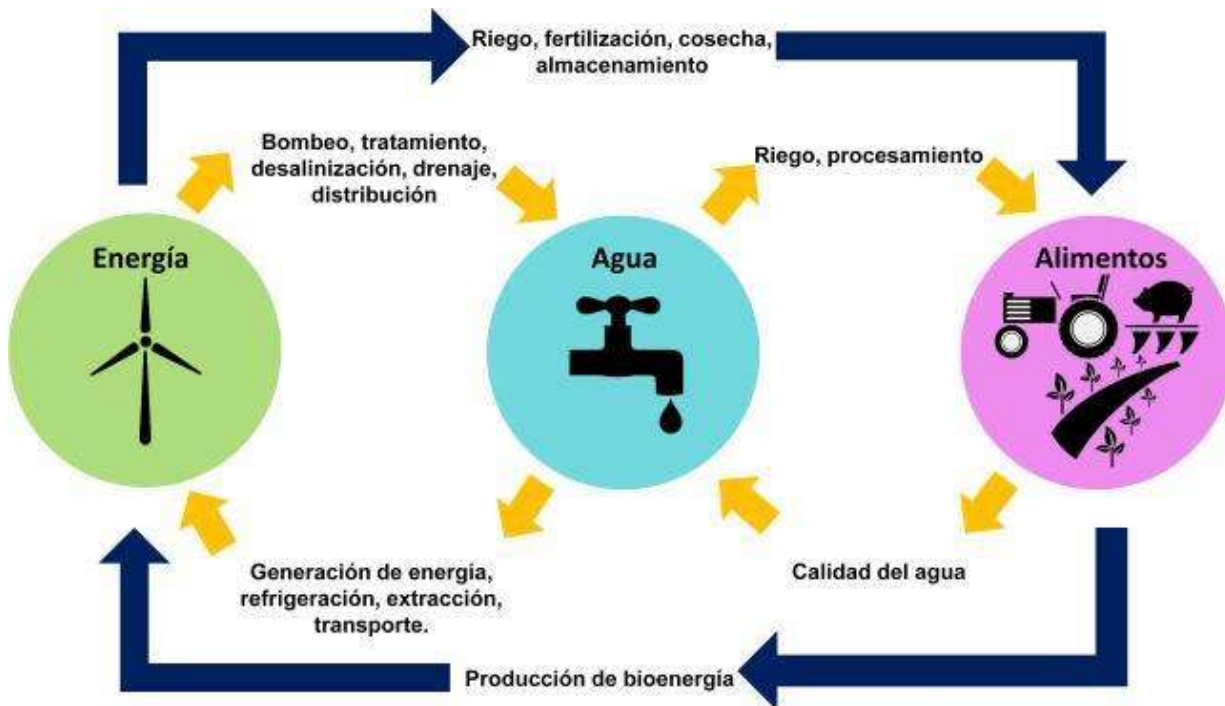


Figura 2.1 Interacciones del Nexo Agua-Energía-Alimentos.

2.2 ISLAS DE RECURSOS URBANOS

El concepto de "islas de recursos urbanos" proporciona un marco para el análisis de la influencia de la geografía en la adquisición y el uso de recursos y permite que las comunidades piensen en sus recursos ocultos e integren este concepto en sus análisis comerciales de sostenibilidad y decisiones políticas (Perrone et al., 2011).

2.3 ISLA DE CALOR HUMANA

La isla de calor urbana es uno de los muchos y grandes efectos climatológicos más notables y monitoreados alrededor del mundo. Luke Howard fue el primero en proporcionar evidencia de que las temperaturas del aire son a menudo más altas en una ciudad que en sus alrededores (Howard, 1833). La isla de calor urbana es un efecto en el que existe una variación en la temperatura que se registra en la ciudad con respecto a las áreas verdes. Se ha observado, mediante un análisis, de acuerdo a la población de un lugar determinado, que la intensidad de la isla de calor en cielos sin nubes está relacionada con la inversa de la velocidad del viento y el logaritmo de la población (Oke, 1973). La rugosidad de la superficie

y los procesos de intercambio de energía y agua, desde facetas individuales del entorno urbano; también afectan este fenómeno (Arnfield, 2003).

2.4 RESILIENCIA

Resiliencia es un concepto concreto que representa la capacidad de superar eventos adversos, y además tener un desarrollo exitoso a pesar de las adversidades, la cual está centrada en la naturaleza. Para este caso, la resiliencia es la capacidad de los sistemas para prevenir o adaptarse a condiciones cambiantes (Levenson et al., 2006). Cuando se diseña un proceso es necesario e importante tomar en consideración aspectos de flexibilidad y control (Morari, 1983), para que ante cualquier problema no se vean afectadas las necesidades a satisfacer. En la práctica, para lograr optimización en la sostenibilidad de eficiencia ecológica, es complicado, debido a las consecuencias al erosionar la capacidad de recuperación de los sistemas de producción (Seager, 2008).

2.5 OPTIMIZACIÓN

La optimización es una herramienta cuantitativa que se fundamenta sobre la formulación matemática, la cual utiliza métodos específicos deterministas y evolutivos para solucionar problemas para obtener costos efectivos, diseñar procesos o simplemente resolver cualquier problema que se presente. La optimización puede involucrar muchas variables, las cuales son importantes para resolver el problema, sin embargo, entre mayor cantidad de variables son tomadas en cuenta, la complejidad de la optimización aumenta.

El objetivo de la optimización es encontrar los valores de las variables de procesos que producen el mejor valor del criterio de rendimiento (Edgar et al., 1988). Sin embargo, para obtener información útil al utilizar computadoras se requiere: un análisis crítico del proceso o diseño, una visión sobre cuáles son los objetivos que se deben lograr y el uso de experiencias pasadas, a veces llamado juicio de ingeniería (Edgar et al., 1988).

Más específicamente, la optimización logrará disminuir, de un proceso determinado, costos fijos, costos de operación, además de disminución de uso de materia prima o productos no deseados, los cuales pueden ser contaminantes para el medio ambiente, generando ganancias y menos contaminación.

2.6 PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

Para la toma de decisiones, la programación matemática representa una gran herramienta. Existen diferentes etapas determinantes para poder realizar la programación matemática y definir el problema de optimización:

- Identificación del problema, así como las decisiones que pueden tomarse para la solución del mismo. En otras palabras, es la identificación de variables.
- Determinación de decisiones factibles, conocidas como restricciones, delimitando la región factible del problema.
- Determinación de función objetivo.

Cuando el problema es multiobjetivo, la complejidad de solución aumenta. Lo anterior debido a que por lo regular los objetivos se contraponen al querer ser satisfechos. El punto donde los múltiples objetivos son satisfechos se conoce como punto utópico, un punto infactible. El punto nadir representa la peor solución factible del problema. En el caso de un problema de este tipo se intenta encontrar un vector de solución que optimice simultáneamente todos los objetivos. El vector se expresa de la siguiente forma:

$$\vec{x}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$$

que satisfaga las m restricciones de desigualdad j de igualdad:

$$g_i(\vec{x}) \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

$$h_j(\vec{x}) = 0, j = 1, 2, \dots, j$$

Optimizando:

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})]^T$$

La función objetivo, también es conocida como índice de rendimiento o criterio de elección.

Capítulo 3 METODOLOGÍA

3.1 SUPERESTRUCTURA

3.2 METODOLOGÍA PROPUESTA DE ÍNDICES DE SEGURIDAD DEL NEXO
WEF EN UNA REGIÓN

3.3 MODELO MATEMÁTICO

3.4 METODOLOGÍA PROPUESTA DE RESILIENCIA ANTE CATÁSTROFES
NATURALES

3.1 SUPERESTRUCTURA

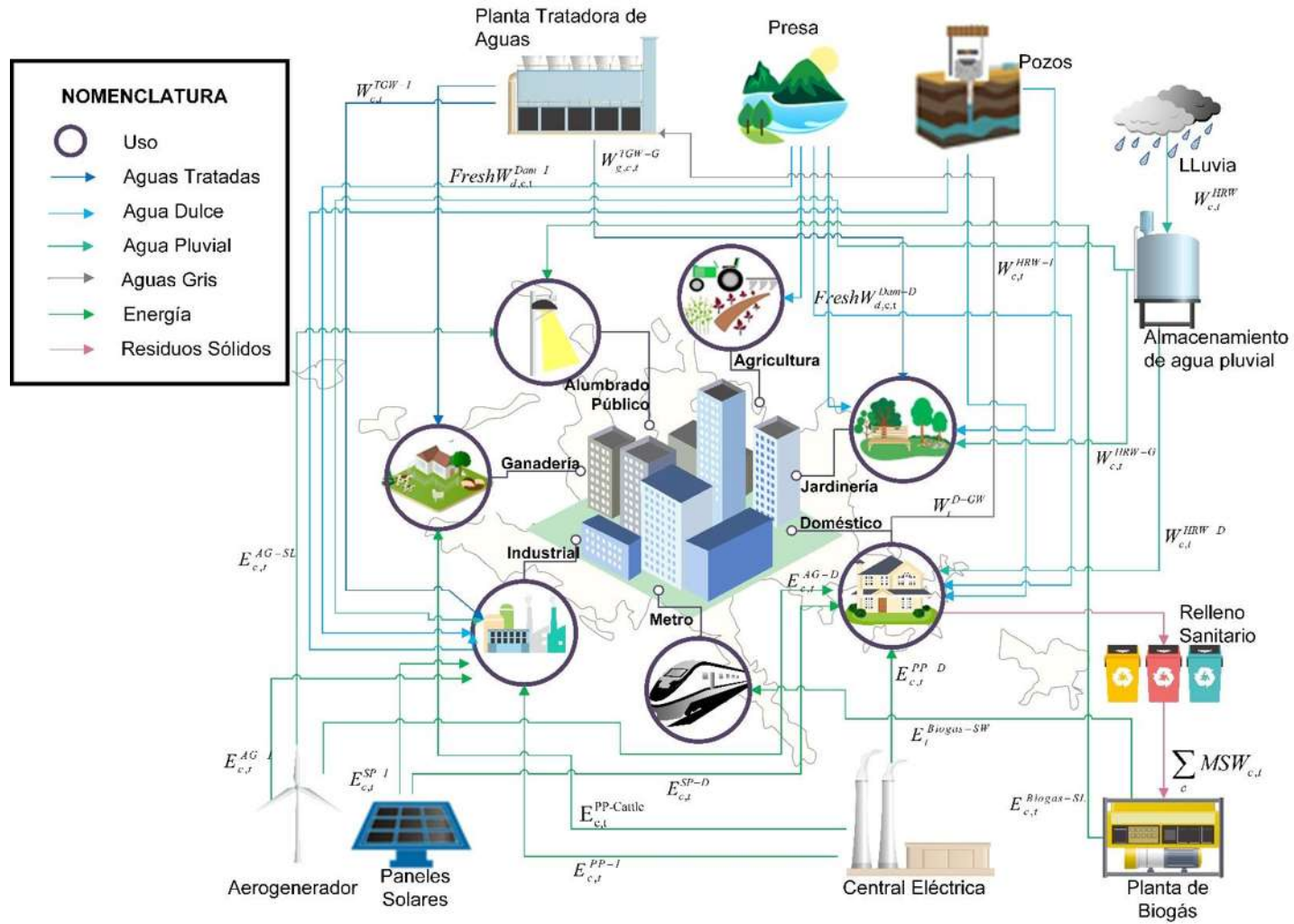


Figura 3.1 Superestructura Propuesta.

La superestructura es la representación gráfica del problema planteado. En la **Figura 3.1** se muestran todas las tecnologías que el modelo matemático puede seleccionar para la solución del problema multiobjetivo. Se considera extracción de agua de fuentes superficial (presas) y subterránea (pozos), colectores de agua pluvial y tratamiento de aguas residuales para cubrir necesidades domésticas, industriales, jardinería y agricultura. En cuanto a energía se propone el uso de centrales eléctricas ya existentes, una planta de biogás que opera a partir de residuos sólidos y la implementación de energía eólica y solar para satisfacer demandas domésticas, industriales, ganadería, metro y alumbrado público.

3.2 METODOLOGÍA PROPUESTA DE ÍNDICES DE SEGURIDAD DEL NEXO WEF EN UNA REGIÓN

A continuación, se presentan varios índices para evaluar la seguridad del WEF en un área o región (r); estos se combinan en diagramas esquemáticos para mostrar las relaciones entre ellos para evaluar el agua, la energía y la seguridad alimentaria. El rango teórico de los índices está entre 0 y 1, donde 0 representa el nivel de seguridad más bajo para el recurso evaluado y 1 el nivel o aspiración más alto. Para la evaluación de la seguridad de los recursos, cada uno de los tres recursos se evalúa de acuerdo con la disponibilidad (1), la accesibilidad (2) y la sostenibilidad (3), conformando un total de nueve índices.

Una limitación importante de la seguridad de un recurso es su disponibilidad. Para el sector del agua, los límites para la generación de agua son las fuentes de agua subterránea y superficial disponibles ubicadas dentro del área o región estudiada. Para el sector energético, la disponibilidad se limita a la generación de fuentes renovables y no renovables, así como a la capacidad máxima instalada. Y para la disponibilidad de alimentos se considera la energía que aportan los productos ganaderos y agrícolas para que una persona esté sana y la energía consumida durante su dieta diaria. Por otro lado, las demandas de agua incluyen el uso para abastecimiento público, agricultura, industria y producción de energía. Las demandas de energía consideran generación de energía eléctrica, combustibles y producción de alimentos. Para conocer las necesidades de importación se analiza la distancia entre la generación y el consumo de cada recurso seleccionado. Las importaciones de agua específicas son la cantidad de agua que se debe transferir de fuentes ubicadas fuera del área o región estudiada. El concepto de la metodología descrita se puede ver esquemáticamente en la **Figura 3.2**.

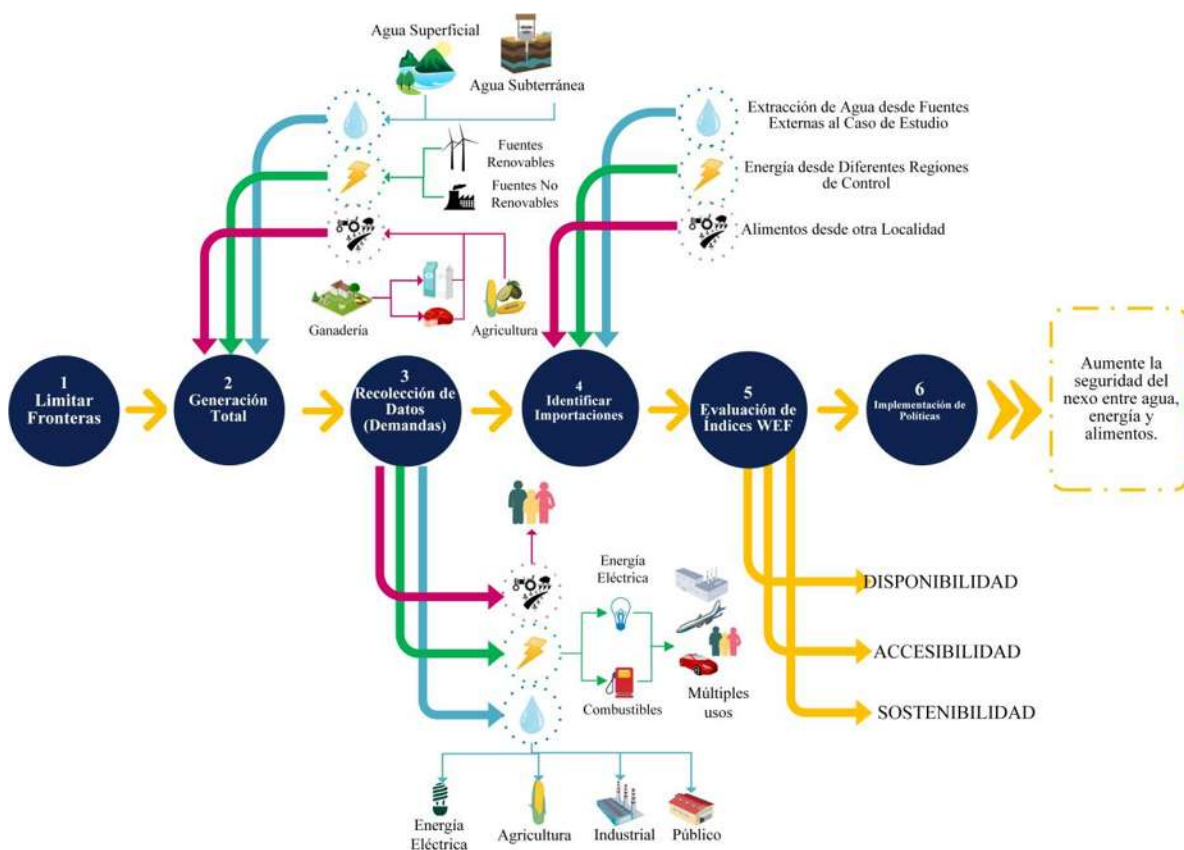


Figura 3.2 Metodología Propuesta Para Evaluación de Índices de Seguridad del Nexo WEF.

Para el agua, la energía y los alimentos, los índices se calculan mediante las **ecuaciones 1 a 9** (Mahlknecht et al., 2019). La disponibilidad de agua (W-1) evalúa la generación o producción de agua en relación con el agua consumida en la zona o región.

$$W - 1_r = \frac{TotWG_r - TotWFoot_r}{TotWG_r} \quad (1)$$

La accesibilidad al agua (W-2) considera la población que tiene acceso al servicio en comparación con la población total.

$$W - 2_r = \frac{TotPop_r - TotPopWACCW_r}{TotPop_r} \quad (2)$$

La sostenibilidad del agua (W-3) se evalúa a través del consumo total de agua menos el agua importada necesaria para satisfacer las demandas.

$$W-3_r = \frac{TotWFoot_r - IW_r}{TotWFoot_r} \quad (3)$$

En el caso del recurso energético, la disponibilidad (E-1) es la diferencia entre la capacidad energética total y la huella energética en relación con la capacidad energética total.

$$E-1_r = \frac{TotEC_r - TotEFoot_r}{TotEC_r} \quad (4)$$

El acceso a la energía (E-2) se evalúa considerando la población que no tiene acceso a la energía eléctrica en relación con la población total.

$$E-2_r = \frac{TotPop_r - TotPopWACCE_r}{TotPop_r} \quad (5)$$

La sostenibilidad energética (E-3) evalúa la energía producida a través de fuentes renovables en comparación con la huella energética total.

$$E-3_r = \frac{TotEFoot_r - TotE^{RE}_r}{TotEFoot_r} \quad (6)$$

En el caso de los índices referidos a alimentos, la disponibilidad de alimentos (F-1) considera la cantidad de energía necesaria para que una persona esté sana y la cantidad de energía consumida a través de la dieta.

$$F-1_r = \frac{AveDER_r - AveDEC_r}{AveDER_r} \quad (7)$$

La accesibilidad alimentaria (F-2) considera la población sana existente, considerando la población total y la población desnutrida.

$$F-2_r = \frac{TotPop_r - UnPop_r}{TotPop_r} \quad (8)$$

Se propone la sostenibilidad alimentaria (F-3) para incluir en el análisis la adición de más grupos de alimentos como huevos, carne, leche (excluida la mantequilla), frutos secos y productos, verduras, además de cereales y derivados. Este índice considera la cantidad total de alimentos y la cantidad de alimentos importados.

$$F - 3_r = \frac{\text{TotFoodDC}_r - \text{TotQImporFood}_r}{\text{TotFoodDC}_r} \quad (9)$$

Los datos necesarios para calcular la disponibilidad de alimentos, el acceso a los alimentos y la sostenibilidad alimentaria se pueden encontrar en la **Tabla 3.1**, con datos obtenidos de la FAO (2017).

Tabla 3.1 Parámetros Referentes a Alimentos Para Diferentes Años, (FAO 2017).

Año	2013	2015	2019	2025	2030	
Categoría	Valor	Valor	Valor	Valor	Valor	Unidades
Población	4'941'059	5'120'000	5'374'471	5'591'177	5'916'236	Personas
Población Desnutrida	1'729'371	1'638'400	1'612'341	1'509'618	1'459'535	Personas
Cantidad Total de Comida Suministrada						
Cereales, Otros	-	-	-	-	-	kg/año
Huevos	92'200'161	97'382'400	112'640'000.00	118'828'335.34	128'154'774	kg/año
Carne, Oros	362'548'540	375'678'276	394'350'000	416'015'217	448'666'859	kg/año
Leche (Excluyendo Mantequilla)	558'636'131	610'764'800	639'615'794	715'726'568	775'198'487	kg/año
Nueces y productos	8'350'390	8'601'600	8'975'367	10'175'942	11'240'848	kg/año
Vegetales, Otros	173'381'760	182'732'800	250'504'093	319'057'720	397'275'247	kg/año
Cantidad Total de Comida Suministrada	1'195'116'982	1'275'159'876	1'406'085'254	1'579'803'782	1'760'536'215	kg/año
Energía Dietética Promedio Consumida						
Cereales, Otros	59'292'708	61'440'000	64'493'652	67'094'124	70'994'832	kcal/día
Huevos	345'874'130	358'400'000	376'212'970	391'382'390	414'136'520	kcal/día
Carne, Oros	9'882'118	10'240'000	10'748'942	11'182'354	11'832'472	kcal/día
Leche (Excluyendo Mantequilla)	345'874'130	358'400'000	376'212'970	391'382'390	414'136'520	kcal/día
Nueces y productos	74'115'885	76'800'000	80'617'065	83'867'655	88'743'540	kcal/día
Vegetales, Otros	182'819'183	189'440'000	198'855'427	206'873'549	218'900'732	kcal/día
Energía Dietética Promedio Consumida Total	1'017'858'154	1'054'720'000	1'107'141'026	1'151'782'462	1'218'744'616	kcal/día
Importada						
Cereales, Otros	39	38	38	38	40	1000 ton
Huevos	79	68	68	68	70	1000 ton
Carne, Oros	0	0	0	0	0	1000 ton

Leche (Excluyendo Mantequilla)	3'691	4'366	5'637	6'214	6'415	1000 ton
Nueces y productos	54	62	56	57	60	1000 ton
Vegetales, Otros	210	193	241	278	312	1000 ton
Cantidad Total Importada	4'073	4'727	6'040	6'655	6'897	1000 ton
Energía Dietética Promedio Requerida	2'900	2'900	2'900	2'900	2'900	kcal/día
Energía Dietética Promedio Consumida	2'690	2'690	2'690	2'690	2'690	kcal/día

Se incorporó el horizonte temporal para mostrar el comportamiento de los índices a lo largo del tiempo. Esto permitió determinar la situación de los sectores involucrados en la seguridad del WEF en el pasado y presente, en base a los datos disponibles. Además, se desarrollaron escenarios futuros que permitan tomar medidas en el sector del agua, energía y alimentos, y apuntar a un desarrollo más sostenible. Estos escenarios se basaron en tendencias y programas sectoriales. Para el sector agua, las proyecciones consideran el Programa Hidráulico del Estado de Nuevo León (CONAGUA y SDANL, 2017), mientras que para el sector energético el pronóstico se hizo con información del Programa Nacional para el Desarrollo del Sistema Eléctrico y Perspectivas del Sector Energía (SENER, 2018). Finalmente, para el sector alimentario las perspectivas se calcularon con base en Tierras agrícolas en México: retrospectiva, oportunidades para la seguridad alimentaria (SAGARPA, 2013) y Perspectivas agrícolas OCDE-FAO (FAO, 2012).

Cabe señalar que la relación conceptual entre los diferentes sectores se desarrolló a partir de la teoría del nexo; esta interrelación se ha determinado conceptualmente a partir de todos los datos analizados. Los recursos conectados están altamente interrelacionados, y estas interrelaciones se han considerado porque se utilizaron datos previamente reportados de diferentes fuentes. Por ejemplo, el agua y la energía necesarias para la agricultura dependen del tipo de agricultura, cultivo, suelo, etc. Se han hecho consideraciones similares para las operaciones con animales y el procesamiento de alimentos. Además, el consumo de agua para la producción de electricidad depende de la tecnología utilizada. Para otros combustibles, el consumo de agua depende del tipo, fuente y tecnología. Los resultados se presentan en un diagrama de radar para mostrar la vulnerabilidad de estos recursos en un área o región determinada durante un tiempo determinado. Esto permite identificar los índices más débiles, desglosar estos índices para comprender los temas más críticos y evaluar

diferentes estrategias o acciones de mejora, lo que lo convierte en una valiosa herramienta de apoyo a las decisiones en las políticas públicas en materia de agua, energía y seguridad alimentaria.

3.3 MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático propuesto describe cada una de las tecnologías seleccionadas para satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos de una región determinada. En general, el modelo incorpora el uso de agua de fuentes superficiales (presas), fuentes subterráneas (pozos), colectores de agua de lluvia y agua regenerada, así como agua importada de otras zonas para uso agrícola. En cuanto a la energía, se propone el uso de fuentes renovables (energía eólica y solar), plantas de biogás y centrales eléctricas. El modelo matemático no predice el funcionamiento de cada tecnología, solo optimiza la selección y el tamaño teniendo en cuenta sus eficiencias y costos. La **Tabla 3.2** muestra los principales parámetros utilizados en el modelo matemático propuesto.

Tabla 3.2 Principales Parámetros Utilizados Para el Estudio de Caso Abordado.

Parámetro	Valor	Unidades	Referencia
α^{BW}	0.2	-	Al-Jayyousi, 2003
α^{GW}	0.8	-	Al-Jayyousi, 2003
α^{BWT}	0.85	-	Núñez-López et al., 2018
α^{GWT}	0.93	-	Núñez-López et al., 2018
$\gamma_{po=CO_2}^{Biogas}$	619.2	Millones ton/ GW-h	PRODESEN, 2018
$\gamma_{po=NO_x}^{Biogas}$	11.6	Millones ton/ GW-h	PRODESEN, 2018
$\gamma_{po=SO_2}^{Biogas}$	14.5	Millones ton/ GW-h	PRODESEN, 2018
$\gamma_{p,po=CO_2}^{Fuel}$	393.3	Millones ton/ GW-h	PRODESEN, 2018
$\gamma_{p,po=NO_x}^{Fuel}$	1.4	Millones ton/ GW-h	PRODESEN, 2018
$\gamma_{p,po=SO_2}^{Fuel}$	0.2	Millones ton/ GW-h	PRODESEN, 2018
δ^{Biogas}	1.86	GW-h/ Hm ³	BENLESA, 2019

$FCost^{AG}$	0.0023	Millones USD	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018
$FCost^{HRW}$	0.002	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
$UCOM^{Biogas}$	46.4	Millones USD/GW-h	PRODESEN, 2018
$UCOM^{HRW}$	4.81	Millones USD/Hm ³	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 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/Hm ³	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018
$VCost^{AG}$	0.05	Millones USD/Hm ²	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018
$VCost^{HRW}$	0.009	Millones USD/Hm ²	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018
$VCost^{SP}$	0.2	Millones USD/Hm ²	Cansino-Loeza and Ponce-Ortega, 2018

3.3.1 Agua

3.3.1.1 Colectores pluviales

La cantidad de agua de lluvia cosechada en cada municipio (c) en un período de tiempo (t) se expresa como ($W_{c,t}^{HRW}$), y es igual al área de recolección disponible en cada municipio (A_c^{HRW}) multiplicado por la precipitación presente en ese período $RF_{c,t}$:

$$W_{c,t}^{HRW} = A_c^{HRW} \cdot RF_{c,t}, \quad \forall c, \forall t \quad (10)$$

La existencia del colector pluvial para uso doméstico es función del área de recolección (A_c^{HRW}) y se determina con el área máxima disponible ($A_c^{HRW-MAX}$) para la instalación del colector multiplicado por una variable binaria (y_c^{HRW}):

$$A_c^{HRW} \leq A_c^{HRW-MAX} \cdot y_c^{HRW}, \quad \forall c \quad (11)$$

La capacidad del sistema de almacenamiento de agua pluvial (Cap_c^{RWSS}) debe ser mayor que el agua almacenada ($W_{c,t}^{HRW}$) durante los períodos considerados:

$$Cap_c^{RWSS} \geq W_{c,t}^{HRW}, \quad \forall c, \forall t \quad (12)$$

La existencia del tanque de almacenamiento se determina con el uso de la variable binaria (y_c^{RWSS}) y la capacidad máxima disponible ($Cap_c^{RWSS-MAX}$):

$$Cap_c^{RWSS} \leq Cap_c^{RWSS-MAX} \cdot y_c^{RWSS}, \quad \forall c \quad (13)$$

Finalmente, el balance total del sistema de almacenamiento de agua pluvial ($W_{c,t}^{HRSS}$) es igual al agua almacenada al final del período de tiempo ($W_{c,t-1}^{HRSS}$), más el agua de entrada al sistema de almacenamiento ($W_{c,t}^{HRW}$), menos la cantidad de agua enviada del sistema para uso doméstico ($W_{c,t}^{HRW-D}$), uso industrial ($W_{c,t}^{HRW-I}$) y uso de jardinería ($W_{c,t}^{HRW-G}$):

$$W_{c,t}^{HRSS} = W_{c,t-1}^{HRSS} + W_{c,t}^{HRW} - W_{c,t}^{HRW-D} - W_{c,t}^{HRW-I} - W_{c,t}^{HRW-G}, \quad \forall c, \forall t \quad (14)$$

3.3.1.2 Agua de Pozos

La cantidad de agua subterránea ($W_{ww,c,t}^{Well}$) extraída es igual a la suma de agua subterránea para uso doméstico ($W_{ww,c,t}^{Well-D}$), industrial ($W_{ww,c,t}^{Well-I}$) y jardinería ($W_{ww,c,t}^{Well-G}$):

$$\sum_{ww} W_{ww,c,t}^{Well} = \sum_{ww} W_{ww,c,t}^{Well-D} + \sum_{ww} W_{ww,c,t}^{Well-I} + \sum_{ww} W_{ww,c,t}^{Well-G}, \quad \forall c, \forall t \quad (15)$$

El agua subterránea extraída ($W_{ww,c,t}^{Well}$) debe ser menor que la capacidad de extracción de cada sistema de pozos (Cap_{ww}^{Well}):

$$W_{ww,c,t}^{Well} \leq Cap_{ww}^{Well} \quad (16)$$

La capacidad de extracción de agua subterránea (Cap_{ww}^{Well}) debe ser menor que la capacidad máxima de extracción subterránea ($Cap_{ww}^{Well-MAX}$) multiplicada por la variable binaria asociada (y_{ww}^{Well}):

$$Cap_{ww}^{Well} \leq Cap_{ww}^{Well-MAX} \cdot y_{ww}^{Well} \quad (17)$$

3.3.1.3 Plantas de Tratamiento de Agua

El total de aguas grises generadas ($W_{c,t}^{D-GW}$) se determinan utilizando un factor de conversión de aguas grises (α^{GW}) multiplicado por la cantidad total de agua que ingresa a cada municipio ($WDemand_{c,t}^D$):

$$W_{c,t}^{D-GW} \leq \alpha^{GW} \cdot WDemand_{c,t}^D, \quad \forall c, \forall t \quad (18)$$

La cantidad total de aguas grises tratadas ($W_{c,t}^{TD-GW}$) es igual a la cantidad de agua de entrada en todas las plantas de tratamiento existentes ($W_{c,t}^{D-GW}$) multiplicado por el factor de aguas grises (α^{GWT}):

$$W_{c,t}^{TGW} = \alpha^{GWT} \cdot W_{c,t}^{D-GW}, \quad \forall t \quad (19)$$

La cantidad total de aguas grises tratadas ($W_{c,t}^{TGW}$) se distribuye para satisfacer demandas para uso industrial en servicios de enfriamiento ($W_{c,t}^{TGW-I}$) y jardinería ($W_{g,c,t}^{TGW-G}$):

$$W_{c,t}^{TGW} = W_{c,t}^{TGW-I} + W_{c,t}^{TGW-G}, \quad \forall c, \forall t \quad (20)$$

La suma de capacidad de cada planta de tratamiento ($\sum_g Cap_g^{TGW}$) debe ser mayor que el agua total de entrada a las plantas de tratamiento ($\sum_c W_{c,t}^{D-GW}$):

$$\sum_g Cap_g^{TGW} \geq \sum_c W_{c,t}^{D-GW}, \quad \forall t \quad (21)$$

La capacidad de la planta de tratamiento de aguas grises ($Cap_g^{TGW-MAX}$) debe ser menor o igual que la capacidad máxima de agua que se puede tratar cada planta ($Cap_g^{TGW-MAX}$) multiplicada por la variable binaria asociada (y_g^{TGW}):

$$Cap_{g,t}^{TGW} \leq Cap_g^{TGW-MAX} \cdot y_g^{TGW}, \quad \forall g, \forall t \quad (22)$$

El total de aguas negras generadas ($W_{c,t}^{D-BW}$) se determinan utilizando un factor de conversión de aguas negras (α^{BW}) multiplicado por la cantidad total de agua que ingresa a cada municipio ($WDemand_{c,t}^D$):

$$W_{c,t}^{D-BW} \leq \alpha^{BW} \cdot WDemand_{c,t}^D, \quad \forall c, \forall t \quad (23)$$

La cantidad total de aguas negras tratadas ($W_{c,t}^{TBW}$) es igual a la cantidad de agua de entrada en todas las plantas de tratamiento existentes ($W_{c,t}^{D-BW}$) multiplicado por el factor de aguas negras (α^{BWT}):

$$W_{c,t}^{TBW} = \alpha^{BWT} \cdot W_{c,t}^{D-BW}, \quad \forall t, \forall c \quad (24)$$

La capacidad de la planta de tratamiento de aguas negras ($Cap_{g,t}^{TBW}$) debe ser menor o igual que la capacidad máxima de agua que se puede tratar cada planta ($Cap_g^{TBW-MAX}$) multiplicada por la variable binaria asociada (y_g^{TBW}):

$$Cap_{g,t}^{TBW} \leq Cap_g^{TBW-MAX} \cdot y_g^{TBW}, \quad \forall g, \forall t \quad (25)$$

3.3.1.4 Agua de presas

La cantidad de agua pluvial recolectada en cada presa en un período de tiempo ($W_{d,t}^{RF-Dam}$), es igual al producto entre el área de la presa (A_d^{Dam}) y la precipitación en ese período ($RF_{d,t}$):

$$W_{d,t}^{RF-Dam} = RF_{d,t} \cdot A_d^{Dam}, \quad \forall d, \forall t \quad (26)$$

El balance total de agua almacenada en cada una de las presas para el tiempo uno ($W_{d,t \leq 1}^{Dam}$) es igual a la cantidad de agua almacenada en el tiempo cero ($W_d^{DamZero}$) más la cantidad de agua captada por precipitaciones en la presa ($W_{d,t \leq 1}^{RF-Dam}$), más el agua de alimentación en cada presa por recarga natural ($NR_{d,t \leq 1}$), menos el agua retirada a través de vertedores hidráulicos ($SPILLWAY_{d,t \leq 1}$), menos la cantidad de agua evaporada ($W_{d,t \leq 1}^{Evap}$) y la cantidad de agua filtrada ($W_{d,t \leq 1}^{Filt}$), menos el agua destinada al distrito de riego o agricultura ($W_{d,c,t \leq 1}^{ID}$), menos el agua enviada para uso doméstico ($FreshW_{d,c,t \leq 1}^{Dam-D}$), uso industrial ($FreshW_{d,c,t \leq 1}^{Dam-I}$) y uso de jardinería ($FreshW_{d,c,t \leq 1}^{Dam-G}$).

$$W_{d,t \leq 1}^{Dam} = W_d^{DamZero} + W_{d,t \leq 1}^{RF-Dam} + NR_{d,t \leq 1} - SPILLWAY_{d,t \leq 1} - W_{d,t \leq 1}^{Evap} - W_{d,t \leq 1}^{Filt} - \sum_c W_{d,c,t \leq 1}^{ID} - \sum_c FreshW_{d,c,t \leq 1}^{Dam-D} - \sum_c FreshW_{d,c,t \leq 1}^{Dam-I} - \sum_c FreshW_{d,c,t \leq 1}^{Dam-G}, \quad \forall d, \forall t \leq 1 \quad (27)$$

El balance total de agua almacenada en cada una de las presas para tiempos mayores que uno ($W_{d,t \gg 1}^{Dam}$) es igual a la cantidad de agua almacenada en el tiempo anterior ($W_{d,t-1}^{Dam}$) más la cantidad de agua captada por precipitaciones en la presa ($W_{d,t \gg 1}^{RF-Dam}$), más el agua de alimentación en cada presa por recarga natural ($NR_{d,t \gg 1}$), menos el agua retirada a través de vertedores hidráulicos ($SPILLWAY_{d,t \gg 1}$), menos la cantidad de agua evaporada ($W_{d,t \gg 1}^{Evap}$) y la cantidad de agua filtrada ($W_{d,t \gg 1}^{Filt}$), menos el agua destinada al distrito de riego o agricultura ($W_{d,c,t \gg 1}^{ID}$), menos el agua enviada para uso doméstico ($FreshW_{d,c,t \gg 1}^{Dam-D}$), uso industrial ($FreshW_{d,c,t \gg 1}^{Dam-I}$) y uso de jardinería ($FreshW_{d,c,t \gg 1}^{Dam-G}$).

$$W_{d,t \gg 1}^{Dam} = W_{d,t-1}^{Dam} + W_{d,t \gg 1}^{RF-Dam} + NR_{d,t \gg 1} - SPILLWAY_{d,t \gg 1} - W_{d,t \gg 1}^{Evap} - W_{d,t \gg 1}^{Filt} - \sum_c W_{d,c,t \gg 1}^{ID} - \sum_c FreshW_{d,c,t \gg 1}^{Dam-D} - \sum_c FreshW_{d,c,t \gg 1}^{Dam-I} - \sum_c FreshW_{d,c,t \gg 1}^{Dam-G}, \quad \forall d, \forall t \gg 1 \quad (27A)$$

Sin embargo, no toda el agua almacenada en cada una de las presas ($W_{d,t}^{Dam}$) puede ser extraída, siendo necesario una ecuación de restricción la cual limite el nivel mínimo en cada presa ($Cap_d^{Dam-Min}$), además cada presa tiene un nivel máximo de operación ($Cap_d^{Dam-Max}$):

$$W_{d,t}^{Dam} \geq Cap_d^{Dam-Min}, \quad \forall d, \forall t \quad (28)$$

$$W_{d,t}^{Dam} \leq Cap_d^{Dam-Max}, \quad \forall d, \forall t \quad (29)$$

El agua total extraída de cada presa es igual a la cantidad de agua extraída para uso doméstico, uso industrial, uso en jardinería y agua destinada para agricultura:

$$TotFreshW^{Dam} = \sum_d \sum_c \sum_t \left[FreshW_{d,c,t}^{Dam-D} + FreshW_{d,c,t}^{Dam-I} + FreshW_{d,c,t}^{Dam-G} + W_{d,c,t}^{ID} \right] \quad (30)$$

La recarga artificial de agua en cada presa (AR) es igual al agua captada ($W_{d,t}^{Dam}$) menos la cantidad de agua en el estado inicial ($W_d^{DamZero}$):

$$AR = \sum_d \left[W_d^{DamZero} + \sum_t W_{d,t}^{Dam} \right] \quad (31)$$

3.3.1.5 Demanda de Agua

En general, la demanda de agua para uso doméstico ($WDemand_{c,t}^D$) en un período determinado es la suma de agua extraída de cada presa ($FreshW_{d,c,t}^{Dam-D}$), más el agua pluvial recolectada ($W_{c,t}^{HRW-D}$) y el agua subterránea ($\sum_{ww} W_{ww,c,t}^{Well-D}$) extraída:

$$WDemand_{c,t}^D = \sum_d FreshW_{d,c,t}^{Dam-D} + W_{c,t}^{HRW-D} + \sum_{ww} W_{ww,c,t}^{Well-D}, \quad \forall c, t \quad (32)$$

En la demanda de agua para uso industrial ($Demand_{c,t}^I$) y jardinería ($WDemand_{c,t}^G$), se incluye la cantidad de aguas grises tratadas ($\sum_g W_{g,c,t}^{TGW}$):

$$WDemand_{c,t}^I = \sum_d FreshW_{d,c,t}^{Dam-I} + W_{c,t}^{HRW-I} + \sum_{ww} W_{ww,c,t}^{Well-I} + \sum_g W_{g,c,t}^{TGW-I}, \quad \forall c, t \quad (33)$$

$$WDemand_{c,t}^G = \sum_d FreshW_{d,c,t}^{Dam-G} + W_{c,t}^{HRW-G} + \sum_{ww} W_{ww,c,t}^{Well-G} + \sum_g W_{g,c,t}^{TGW-G}, \quad \forall c,t \quad (34)$$

La demanda de agua destinada para agricultura ($WDemand_{c,t}^{Agriculture}$) es únicamente satisfecha con agua proveniente de cada una de las presas:

$$WDemand_{c,t}^{Agriculture} = \sum_d W_{d,c,t}^{ID}, \quad \forall c, \forall t \quad (35)$$

3.3.2 Energía

3.3.2.1 Paneles Solares

La electricidad producida por paneles solares ($E_{c,t}^{SP}$) es el producto entre área del panel solar (A_c^{SP}), su eficiencia (η^{SP}), el factor de radiación solar ($h_{c,t}$) y el coeficiente de rendimiento (PR):

$$E_{c,t}^{SP} = A_c^{SP} \cdot \eta^{SP} \cdot h_{c,t} \cdot PR, \quad \forall c, \forall t \quad (36)$$

El tamaño del panel solar (A_c^{rotor}) está limitado por el área de instalación disponible ($A_c^{rotor-MAX}$), multiplicado por la variable binaria asociada (y_c^{AG}):

$$A_c^{rotor} \leq A_c^{rotor-MAX} \cdot y_c^{AG}, \quad \forall c \quad (37)$$

La energía solar total generada ($E_{c,t}^{SP}$) debe ser mayor que la energía solar destinada para uso doméstico ($E_{c,t}^{SP-D}$) y uso industrial ($E_{c,t}^{SP-I}$):

$$E_{c,t}^{SP} \geq E_{c,t}^{SP-D} + E_{c,t}^{SP-I}, \quad \forall c, \forall t \quad (38)$$

3.3.2.2 Aerogeneradores

La energía generada a través de nuevos aerogeneradores ($E_{c,t}^{NF-AG}$) es función de la velocidad del viento ($WindS$), el coeficiente de potencia máxima (CP^{max}), densidad del aire (ρ^{air}) y el área del rotor del aerogenerador (A_c^{rotor}):

$$E_{c,t}^{NF-AG} = CP^{max} \cdot \rho^{air} \cdot A_c^{rotor} \cdot WindS_{c,t}, \quad \forall c, \forall t \quad (39)$$

La instalación del aerogenerador (A_c^{rotor}) está limitado por el área máxima disponible para la instalación ($A_c^{rotor-MAX}$), multiplicado por su variable asociada (y_c^{AG}):

$$A_c^{rotor} \leq A_c^{rotor-MAX} \cdot y_c^{AG}, \quad \forall c \quad (40)$$

La energía generada a través de generadores existentes ($E_{c=12,t}^{E-AG}$) es función del coeficiente de potencia máxima (CP^{MAX}), el número de aerogeneradores existentes ($NumbAG_{c=12}$) y la velocidad del viento ($Winds_{c=12,t}$):

$$E_{c=12,t}^{E-AG} = CP^{MAX} \cdot NumbAG_{c=12} \cdot Winds_{c=12,t}, \quad \forall t \quad (41)$$

$$NumbAG_{c=12} \leq NumbEAG_{c=12} \quad (42)$$

La energía eólica total generada ($E_{c,t}^{AG}$) es la suma de la energía generada por los aerogeneradores existentes ($E_{c=12,t}^{E-AG}$) y aerogeneradores nuevos instalados ($E_{c,t}^{NF-AG}$), además, debe ser mayor que le energía eólica destinada para uso doméstico ($E_{c,t}^{AG-D}$), uso industrial ($E_{c,t}^{AG-I}$) y uso en alumbrado público ($E_{c,t}^{AG-SL}$):

$$E_{c,t}^{AG} = E_{c=12,t}^{E-AG} + E_{c,t}^{NF-AG}, \quad \forall c, \forall t \quad (43)$$

$$E_{c,t}^{AG} \geq E_{c,t}^{AG-D} + E_{c,t}^{AG-I} + E_{c,t}^{AG-SL}, \quad \forall c, \forall t \quad (44)$$

3.3.2.3 Energía Producida por Fuentes Renovables

La energía total generada por medio de fuentes renovables ($E_{c,t}^{RE}$), en cada municipio en cierto período de tiempo, es la suma de la energía a través de paneles solares ($E_{c,t}^{SP}$) y aerogeneradores ($E_{c,t}^{AG}$):

$$E_{c,t}^{RE} = E_{c,t}^{SP} + E_{c,t}^{AG}, \quad \forall c, \forall t \quad (45)$$

3.3.2.4 Planta de Biogás

La energía total obtenida de la planta de Biogás (E_t^{Biogas}) es igual al factor de conversión de Biogás (δ^{Biogas}) multiplicado por la cantidad de residuos sólidos recolectados

$$\left(\sum_c MSW_{c,t} \right):$$

$$E_t^{Biogas} = \delta^{Biogas} \cdot \sum_c MSW_{c,t}, \quad \forall t \quad (46)$$

La capacidad de residuos sólidos (Cap^{MSW}) debe ser mayor que la cantidad de residuos sólidos recolectados de todos los municipios ($MSW_{c,t}$):

$$Cap^{MSW} \geq \sum_c MSW_{c,t}, \quad \forall t \quad (47)$$

La cantidad total de residuos sólidos recolectados en todos los municipios (Cap^{MSW}) deben ser menor que la capacidad máxima de residuos sólidos tratados ($Cap^{MSW-MAX}$) por su variable binaria asociada (y^{MSW}):

$$Cap^{MSW} \leq Cap^{MSW-MAX} \cdot y^{MSW} \quad (48)$$

La cantidad de energía total obtenida de la planta de Biogás (E_t^{Biogas}) debe ser mayor que la cantidad de energía destinada para uso de alumbrado público ($E_{c,t}^{Biogas-SL}$) y uso en el sistema metropolitano de transporte colectivo (metro) ($E_t^{Biogas-SW}$):

$$E_t^{Biogas} \geq \sum_c E_{c,t}^{Biogas-SL} + E_t^{Biogas-SW}, \quad \forall t \quad (49)$$

3.3.2.5 Centrales Eléctricas

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

$$E_{p,t}^{PP} = \eta_p^{Fuel} \cdot Fuel_{p,t}, \quad \forall p, \forall t \quad (50)$$

La capacidad máxima de cada central eléctrica (Cap_p^{PP-MAX}) debe ser mayor o igual a la energía producida en cada planta ($E_{p,t}^{PP}$) para un tiempo determinado:

$$y_p^{PP} \cdot Cap_p^{PP-MAX} \geq E_{p,t}^{PP}, \quad \forall p, \forall t \quad (51)$$

La energía total producida en las centrales eléctricas ($\sum_p E_{p,t}^{PP}$) es igual a 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 en ganadería ($E_{c,t}^{PP-Cattle}$) y bombeo ($E_{c,t}^{PP-Pumping}$):

$$\sum_p E_{p,t}^{PP} \geq E_{c,t}^{PP-D} + E_{c,t}^{PP-I} + E_{c,t}^{PP-Cattle} + E_{c,t}^{PP-Pumping}, \quad \forall c, t \quad (52)$$

3.3.2.6 Demanda de Energía

En general, la demanda de electricidad enviada para uso doméstico ($EDemand_{c,t}^D$) y uso industrial ($EDemand_{c,t}^I$) en un período determinado es la suma de la electricidad generada en las centrales eléctricas ($E_{c,t}^{PP}$), más la energía generada a partir de fuentes renovables como paneles solares ($E_{c,t}^{SP}$) y aerogeneradores ($E_{c,t}^{AG}$):

$$EDemand_{c,t}^D = E_{c,t}^{PP-D} + E_{c,t}^{AG-D} + E_{c,t}^{SP-D}, \quad \forall c, t \quad (53)$$

$$EDemand_{c,t}^I = E_{c,t}^{PP-I} + E_{c,t}^{AG-I} + E_{c,t}^{SP-I}, \quad \forall c, t \quad (54)$$

La energía enviada para uso de alumbrado público ($EDemand_{c,t}^{SL}$) en cada uno de los municipios es la suma de la energía generada en la planta de biogás ($E_{c,t}^{Biogas-SL}$) y a través de los aerogeneradores ($E_{c,t}^{AG-SL}$):

$$EDemand_{c,t}^{SL} = E_{c,t}^{AG-SL} + E_{c,t}^{Biogas-SL}, \quad \forall c, t \quad (55)$$

Para el caso del Sistema Metropolitano de Transporte Colectivo (metro) ($EDemand^{SW}$) la energía es únicamente a partir de la planta de Biogás ($E_t^{Biogas-SW}$):

$$EDemand_t^{SW} = E_t^{Biogas-SW}, \quad \forall t \quad (56)$$

La demanda de energía para uso en ganadería ($EDemand_{c,t}^{Cattle}$) y uso en bombeo ($EDemand_{c,t}^{Pumping}$) únicamente se da con energía proveniente de centrales eléctricas:

$$EDemand_{c,t}^{Cattle} = E_{c,t}^{PP-Cattle}, \quad \forall c, t \quad (57)$$

$$EDemand_{c,t}^{Pumping} = E_{c,t}^{PP-Pumping}, \quad \forall c, t \quad (58)$$

3.3.3 Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero se calculan multiplicando el factor de emisión ($\gamma_{p,po}^{Fuel}$) asociado a cada una de las uno de los tiempos de plantas de proceso multiplicado por el flujo del combustible suministrado a la unidad ($Fuel_{p,t}$):

Centrales Eléctricas

$$GHGE^{PP} = \sum_p \sum_t \sum_{po} \gamma_{p,po}^{Fuel} \cdot Fuel_{p,t} \quad (59)$$

Planta de Biogás

$$GHGE^{Biogas} = \sum_t \sum_c \sum_{po} \gamma_{po}^{Biogas} \cdot MSW_{c,t} \quad (60)$$

3.3.4 Costos

3.3.4.1 Costos de Capital

Los Costos de Capital ($CapCost$) están constituidos por el Costo Fijo de cada una de las unidades ($FCost$) multiplicado por su variable binaria asociada, más el costo variable de cada unidad ($VCost$) multiplicado por su capacidad. Por lo tanto, para cada unidad tenemos que:

Costos de Capital para colectores pluviales:

$$CapCost^{HRW} = \sum_c \left[FCost^{HRW} \cdot y_c^{HRW} + VCost^{HRW} \cdot A_c^{HRW} + VCost^{HRW} \cdot Cap_c^{RWSS} \right] \quad (61)$$

Costos de Capital para Paneles Solares:

$$CapCost^{SP} = \sum_c \left[FCost^{SP} \cdot y_c^{SP} + VCost^{SP} \cdot A_c^{SP} \right] \quad (54)$$

Costos de Capital para Aerogeneradores:

$$CapCost^{AG} = \sum_c \left[FCost^{AG} \cdot y_c^{AG} + VCost^{AG} \cdot A_c^{rotor} + VCost^{AG} \cdot NumbAG_{c=12} \right] \quad (55)$$

Costos Totales de Capital:

$$TotCapCost = CapCost^{HRW} + CapCost^{SP} + CapCost^{AG} \quad (56)$$

3.3.4.2 Costos de Operación y Mantenimiento

Los Costos de Operación y Mantenimiento de todo proceso se calcula con base a la producción multiplicado por su Costo Unitario correspondiente:

Costo por Bombeo de Agua:

$$\begin{aligned} PumpingCost = & \sum_d \sum_c \sum_t UPumpCost_{d,c}^{Dam-D} \cdot FreshW_{d,c,t}^{Dam-D} + \\ & \sum_c \sum_t UPumpCost_c^{HRW-D} \cdot W_{c,t}^{HRW-D} + \sum_{ww} \sum_c \sum_t UPumpCost_{ww,c}^{Well-D} \cdot W_{ww,c,t}^{Well-D} + \\ & \sum_d \sum_c \sum_t UPumpCost_{d,c}^{Dam-I} \cdot FreshW_{d,c,t}^{Dam-I} + \sum_t \sum_c UPumpCost_c^{HRW-I} \cdot W_{c,t}^{HRW-I} + \\ & \sum_{ww} \sum_c \sum_t UPumpCost_{ww,c}^{Well-I} \cdot W_{ww,c,t}^{Well-I} + \sum_g \sum_c \sum_t UPumpCost_{g,c}^{TGW-I} \cdot W_{g,c,t}^{TGW-I} + \\ & \sum_d \sum_c \sum_t UPumpCost_{d,c}^{Dam-G} \cdot FreshW_{d,c,t}^{Dam-G} + \sum_t \sum_c UPumpCost_{c,t}^{HRW-G} \cdot W_{c,t}^{HRW-G} + \\ & \sum_{ww} \sum_c \sum_t UPumpCost_{ww,c}^{Well-G} \cdot W_{ww,c,t}^{Well-G} + \sum_g \sum_c \sum_t UPumpCost_{g,c}^{TGW-G} \cdot W_{g,c,t}^{TGW-G} \end{aligned} \quad (57)$$

Costo de Operación y Mantenimiento del Sistema de Almacenamiento de Colector Pluvial:

$$OMCost^{HRW} = UCOM^{HRW} \cdot \sum_c \sum_t W_{c,t}^{HRSS} \quad (58)$$

Costo de Operación y Mantenimiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Grises:

$$OMCost^{TGW} = UCOM^{TGW} \cdot \sum_t W_t^{D-GW} \quad (59)$$

Costo de Operación y Mantenimiento de Paneles Solares:

$$OMCost^{SP} = UCOM^{SP} \cdot \sum_t \sum_c [E_{c,t}^{SP-D} + E_{c,t}^{SP-I}] \quad (62)$$

Costo de Operación y Mantenimiento de Aerogeneradores:

$$OMCost^{AG} = UCOM^{AG} \cdot \sum_t \sum_c [E_{c,t}^{AG-D} + E_{c,t}^{AG-I} + E_{c,t}^{AG-SL}] \quad (63)$$

Costo de Operación y Mantenimiento de Planta de Biogás:

$$OMCost^{Biogas} = UCOM^{Biogas} \cdot \sum_t \sum_c [E_{c,t}^{Biogas-SL} + E_t^{Biogas-SW}] \quad (64)$$

Costo de Operación y Mantenimiento de Centrales Eléctricas:

$$OMCost^{PP} = UCOM^{PP} \cdot \sum_t \sum_c [E_{c,t}^{PP-D} + E_{c,t}^{PP-I}] \quad (65)$$

Costo Total de Operación y Mantenimiento:

$$TotOptCost = PumpingCost + OMCost^{HRW} + OMCost^{TGW} + OMCost^{SP} + OMCost^{AG} + OMCost^{Biogas} + OMCost^{PP} \quad (66)$$

3.3.5 Costos Total Anual

El costo total anual es igual al costo total de operación más el costo total de capital multiplicado por el factor de anualización:

$$TAC = \kappa_F \cdot TotCapCost + TotOptCost \quad (67)$$

3.3.6 Función Objetivo

Consumo de Agua dulce que es igual al agua extraída de fuentes superficiales y subterráneas:

$$TotWFresh = \sum_t \sum_c \sum_{ww} W_{ww,c,t}^{Well} + TotFreshW^{Dam} \quad (68)$$

Emissiones Totales de Gases de Efecto Invernadero:

$$TotGHGE = GHGE^{PP} + GHGE^{Biogas} \quad (69)$$

3.3.7 Índices de Seguridad de Nexo WEF

Los índices de seguridad en un área o región (r), se evalúan con las siguientes **9 ecuaciones** explicadas anteriormente, las cuales miden la seguridad de cada recurso (agua, energía y alimentos) de acuerdo con la disponibilidad (1), accesibilidad (2) y sostenibilidad (3). Estos 9 índices en total van de 0-1, en donde 1 representa la mayor satisfacción del índice.

Disponibilidad de agua:

$$W-1_r = \frac{TotWG_r - TotWFoot_r}{TotWG_r} \quad (1)$$

Accesibilidad de agua:

$$W-2_r = \frac{TotPop_r - TotPopWACCW_r}{TotPop_r} \quad (2)$$

Sostenibilidad de agua:

$$W-3_r = \frac{TotWFoot_r - IW_r}{TotWFoot_r} \quad (3)$$

Disponibilidad de Energía:

$$E-1_r = \frac{TotEC_r - TotEFoot_r}{TotEC_r} \quad (4)$$

Accesibilidad de Energía:

$$E-2_r = \frac{\text{TotPop}_r - \text{TotPopWACCE}_r}{\text{TotPop}_r} \quad (5)$$

Sostenibilidad de Energía:

$$E-3_r = \frac{\text{TotEFoot}_r - \text{TotE}^{RE}_r}{\text{TotEFoot}_r} \quad (6)$$

Disponibilidad de Alimentos:

$$F-1_r = \frac{\text{AveDER}_r - \text{AveDEC}_r}{\text{AveDER}_r} \quad (7)$$

Accesibilidad de Alimentos:

$$F-2_r = \frac{\text{TotPop}_r - \text{UnPop}_r}{\text{TotPop}_r} \quad (8)$$

Sostenibilidad de Alimentos:

$$F-3_r = \frac{\text{TotFoodDC}_r - \text{TotQImporFood}_r}{\text{TotFoodDC}_r} \quad (9)$$

El total de agua generada (TotWG) es la suma del agua generada a través de cada una de las fuentes propuestas, como son: agua pluvial ($W_{c,t}^{HRW}$), agua tratada ($\text{Cap}_g^{\text{TGW-MAX}}$), agua subterránea ($\text{Cap}_{\text{ww}}^{\text{Well-MAX}}$) y de presa ($W_{d,t}^{\text{Dam}}$):

$$\text{TotWG} = \sum_c \sum_t W_{c,t}^{HRW} + \sum_{\text{ww}} (\text{Cap}_{\text{ww}}^{\text{Well-MAX}} \cdot y_{\text{ww}}^{\text{Well}}) + \sum_g \text{Cap}_g^{\text{TGW-MAX}} + \sum_d \sum_t W_{d,t}^{\text{Dam}} \quad (70)$$

El agua total consumida (TotWFoot) por la población es la suma de la demanda requerida en cada uno de los usos:

$$\text{TotWFoot} = \sum_c \sum_t \left[\text{WDemand}_{c,t}^D + \text{Demand}_{c,t}^I + \text{WDemand}_{c,t}^G + \text{WDemand}_{c,t}^{\text{Agriculture}} \right] \quad (71)$$

La capacidad total de energía ($TotEC$) es la suma de toda la energía generada por fuentes renovables, la capacidad máxima de la planta de biogás y la capacidad máxima de cada central de energía:

$$TotEC = \sum_c \sum_t E_{c,t}^{RE} + (\delta^{Biogas} \cdot Cap^{MSW-MAX}) + \sum_p Cap_p^{PP-MAX} \quad (72)$$

La energía total consumida ($TotEFoot$) es la suma de las demandas requeridas para cada uso:

$$TotEFoot = \sum_c \sum_t \left[EDemand_{c,t}^D + EDemand_{c,t}^I + EDemand_{c,t}^{SL} + EDemand^{SW} + EDemand_{c,t}^{Cattle} + EDemand_{c,t}^{Pumping} \right] \quad (73)$$

La cantidad total de alimentos consumidos ($TotEFoodDC$) es igual a la suma de los diferentes grupos alimenticios considerados:

$$TotEFoodDC = Cereals + Eggs + Meat + Milk + Nuts + Vegetables \quad (81)$$

3.3.8 Enfoque Multistakeholder

Minimizando cada uno de los objetivos ($TAC, TotWFresh, TotGHGE$) es posible crear el punto utópico con los menores valores obtenidos de cada objetivo. El punto utópico es infactible ya que los objetivos se contraponen por querer ser satisfechos y afectando directamente la optimización de los índices de seguridad. El enfoque multiobjetivo propuesto para solucionar el modelo matemático MINLP consta en crear una nueva función objetivo la cual involucre maximizar los valores de los índices de seguridad.

$$Max \left[\omega(W - 1) + \omega(W - 3) + \omega(E - 1) + \omega(E - 3) \right] \quad (74)$$

Cada índice de la función objetivo nueva estará multiplicada por un peso aleatorio (ω), esto permitirá encontrar soluciones dando diferentes prioridades para ser satisfechas y finalmente conocer el comportamiento de las funciones. Debido a la complejidad por resolver del modelo matemático es necesario realizar dos etapas para asegurar que el programa encuentre un máximo local acercando al área de búsqueda. Lo anterior se logra con un primer “solve” minimizando cualquier de los tres objetivos ($TAC, TotWFresh, TotGHGE$) sirviendo como un punto de partida y un segundo “solve” maximizando la función objetivo que

involucra la optimización de los índices de seguridad. La aplicación del enfoque se explica a detalle en la sección de resultados.

3.4 METODOLOGÍA PROPUESTA DE RESILIENCIA ANTE CATÁSTROFES NATURALES

Un sistema resiliente debe ser capaz de minimizar las pérdidas en la prestación de sus servicios, ante cualquier posible tipo de falla y durante todos los períodos operativos. La metodología completa descrita en Núñez-López et al. (2021) consiste en definir primero el sistema, sus entradas y salidas. Posteriormente se deben establecer servicios funcionales y asignar un costo para cada uno de ellos. Se continúa identificando la matriz tridimensional, la cual está compuesta por escenarios formados por los servicios funcionales que pueden verse afectados en un determinado período de tiempo debido a algún tipo de falla, períodos de tiempo específicos y posibles fallas que puedan ocurrir.

1. Identificar una matriz tridimensional (**Figura 3.3**), mediante el análisis de los escenarios obtenidos del modelo matemático.

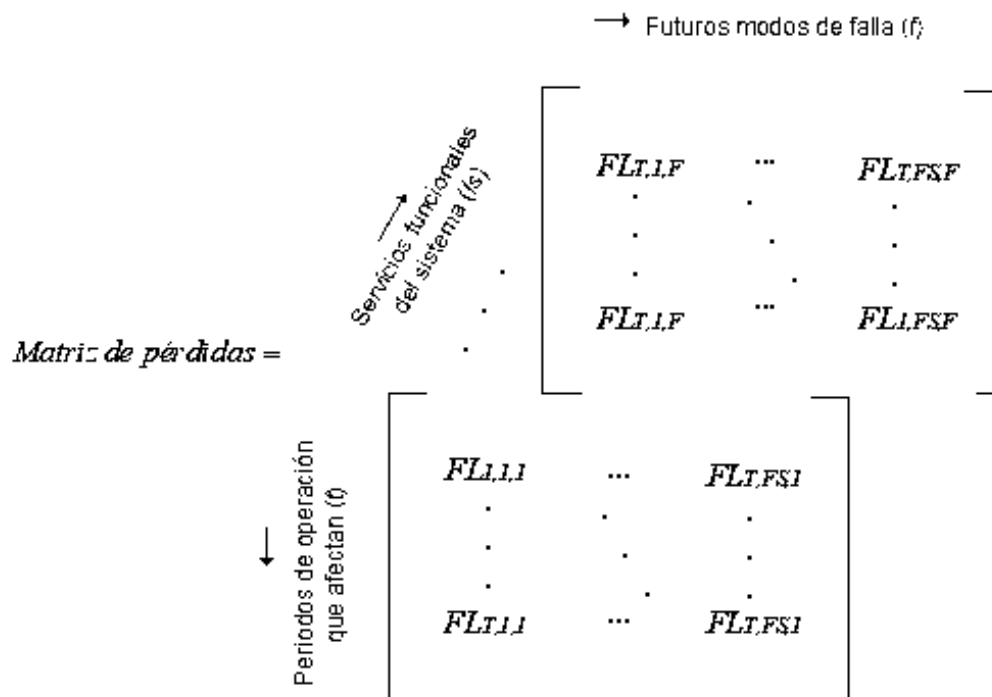


Figura 3.3 Representación Matricial Tridimensional.

2. Calcular una matriz bidimensional (**Figura 3.4**) mediante la estimación de los costos impuestos del sistema según las prioridades de cada uno de los escenarios según la **Ecuación 75**.

$$\text{Matriz de consecuencia} = \begin{bmatrix} \text{ImpCost}_{t,1} & \dots & \text{ImpCost}_{t,FS} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \text{ImpCost}_{t,1} & \dots & \text{ImpCost}_{t,FS} \end{bmatrix}$$

Figura 3.4 Representación Matricial Bidimensional.

3. Evalúe los índices de resiliencia (**Figura 3.5**) para diferentes posibles fallas en los diferentes períodos de tiempo utilizando la **Ecuación 76**.

$$\text{Matriz de resiliencia} = \begin{bmatrix} Re_{t,1} & \dots & Re_{t,FS} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ Re_{t,1} & \dots & Re_{t,FS} \end{bmatrix}$$

Figura 3.5 Matriz de Resiliencia Bidimensional.

4. Identificar los componentes críticos del sistema a partir de los índices de resiliencia obtenidos y proponer una estrategia para mejorarlos.

El costo impuesto relacionado con cada posible falla en cada período de tiempo se calcula de la siguiente manera:

$$\text{ImpCost}_{f,t} = \sum_{fs} \text{PenalizationCost}_{fs} \text{Unit}_{fs} \quad (75)$$

El costo de penalización es $(PenalizationCost_{fs})$ para cada servicio funcional (fs) en cada año analizado, y $(Unit_{fs})$ son cada valor en la matriz tridimensional. Luego, el índice de resiliencia se calcula utilizando los costos impuestos máximos y mínimos y el costo impuesto para el escenario real:

$$Re_{ft} = \frac{ImpCost^{Max} - ImpCost_{ft}}{ImpCost^{Max} - ImpCost^{Min}} \quad (76)$$

El índice de resiliencia varía entre 0 y 1. $Re_{ft} = 0$ representa los escenarios en los que el sistema no podría entregar ninguno de sus servicios funcionales, y $Re_{ft} = 1$ es cuando la funcionalidad del sistema no se interrumpiría en absoluto ante cualquier cambio.

Capítulo 4 RESULTADOS

- 4.1 RESULTADOS DE ÍNDICES DE SEGURIDAD DEL NEXO WEF
- 4.2 RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA SEGURIDAD HÍDRICA-
ENERGÉTICA-ALIMENTARIA
- 4.3 EVALUACIÓN DE ÍNDICES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY
- 4.4 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO
- 4.5 RESULTADOS DE RESILIENCIA ANTE CATÁSTROFES NATURALES

4.1 RESULTADOS DE ÍNDICES DE SEGURIDAD DEL NEXO WEF

Para analizar la seguridad del WEF en Nuevo León, se desarrolló un gráfico de radar con nueve vértices para el último año de datos disponibles (2019) (**Figura 4.1**) que muestra la evaluación de los índices presentados en las ecuaciones 1 a 9. Este gráfico muestra un valor de cero con respecto a la disponibilidad de agua (W-1) debido al déficit de balance hídrico existente, mientras que la accesibilidad al agua (W-2) y la sostenibilidad del agua (W-3) están cerca de 1. De manera similar, la disponibilidad de energía (E-1) y la sostenibilidad energética (E-3) se encuentra en el nivel mínimo debido a la baja generación de energía local y la baja participación de fuentes renovables en la combinación de fuentes de energía, y la accesibilidad energética (E-2) es muy alta. En cuanto a disponibilidad de alimentos (F-1) y sostenibilidad alimentaria (F-3), estos índices reflejan la alta proporción de población desnutrida y la dependencia de alimentos importados para satisfacer las demandas de todos los grupos de alimentos analizados.

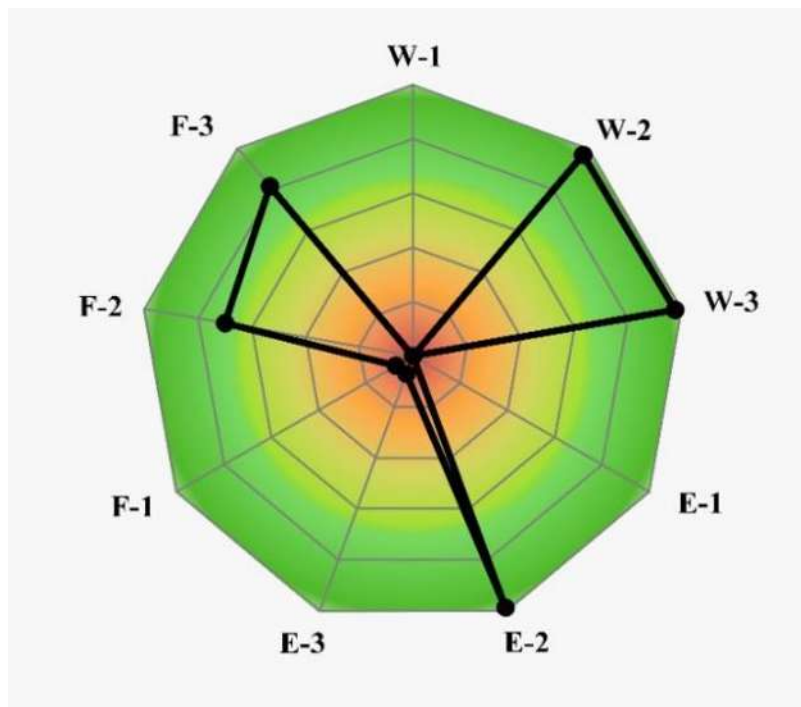


Figura 4.1 Representación Esquemática de los Índices de Seguridad Evaluados en el Estado de Nuevo León México (2019).

La evaluación de los índices de nexos del WEF a través de gráficos radar se realizó para otros períodos, concretamente 2013 y 2015, así como también se han realizado proyecciones para 2025 y 2030 (**Figura 4.2**). Los gráficos de radar muestran las diferencias en disponibilidad, acceso y sostenibilidad. En general, los resultados de todos 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 son desfavorables debido a la sobreexplotación de estos recursos y las condiciones climáticas existentes en la región.

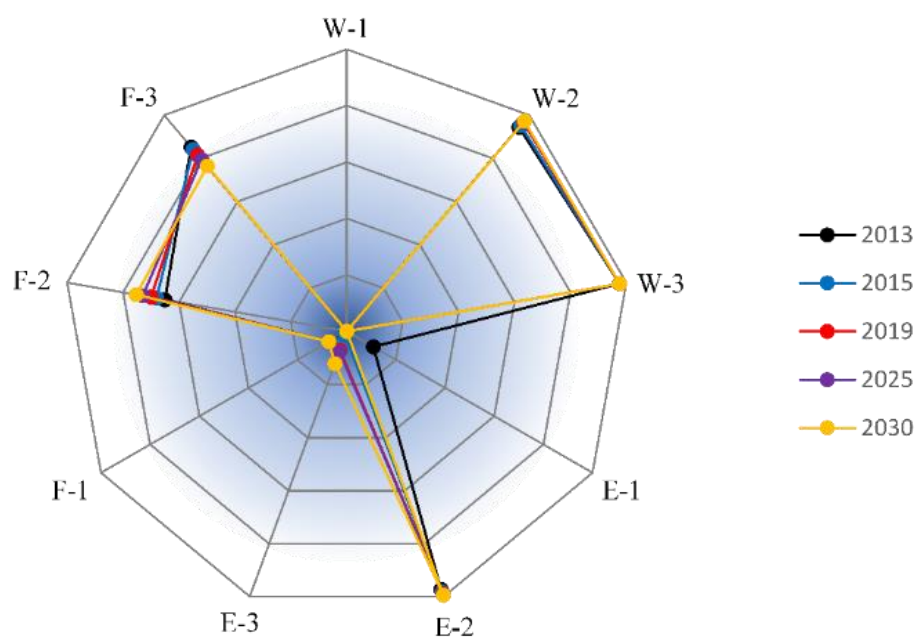


Figura 4.2 Índices Calculados de 2013 a 2030 del Nexo WEF.

Al igual que 2019, en 2013 la disponibilidad de agua (W-1) mostró un índice de 0 reflejando la sequía de 2011-2013, considerada como una de las peores de los últimos 50 años. El índice de accesibilidad al agua (W-2) es favorable debido a la excelente infraestructura relacionada con la distribución del agua. Aproximadamente el 99% de la población tiene acceso a un servicio de agua mejorado y el 97% a un servicio de saneamiento mejorado. El índice de sostenibilidad (W-3) muestra riesgos, ya que depende de que aproximadamente la mitad del agua se importe de otra región (Tamaulipas), lo que representa

un uso agrícola competitivo del agua y se magnifica por el crecimiento de la población urbana como consecuencia de su importancia económica.

En el caso de los índices energéticos, como 2019, la disponibilidad (E-1) y la sostenibilidad (E-3) reflejan déficits. La razón de la brecha en el sector energético (E-1, E-3) se debe a la baja producción local de energía para cumplir con una de las tasas de consumo de energía estatales más altas de México. En cuanto a la sostenibilidad, se atribuye a la escasa participación de las energías renovables, incluso con la posibilidad de apostar por ellas. El acceso a la energía (E-2) muestra resultados favorables debido al correcto diseño de las redes y distribución para que el porcentaje más significativo de la población tenga acceso a la energía.

En el caso de los índices alimentarios, es sumamente difícil para el estado mejorar los índices asociados debido al clima severo, la escasez de agua, el tipo de suelo y la ubicación geográfica del estado. La región presenta un exceso de oferta alimentaria, principal motivo del riesgo de disponibilidad de alimentos (F-1). El índice de accesibilidad alimentaria (F-2) es favorable en relación con el poder adquisitivo de la población. El parámetro de sostenibilidad alimentaria (F-3) mantiene un riesgo porque la región depende de un cierto porcentaje de las importaciones debido a la producción relativamente baja de la agricultura en relación con el consumo de la zona. Sin embargo, es fundamental señalar que, debido al clima presente en la zona, sería casi imposible no depender de las importaciones de alimentos, y este riesgo podría considerarse menor que el de perder cosechas durante períodos prolongados de sequía como sucedía de manera recurrente (ej. en 2011-2012). Como se mencionó en la presentación del estudio de caso, debido a su alta participación en las actividades manufactureras, el Estado de Nuevo León brinda un aporte significativo al PIB Nacional. Esto conduce a un elevado poder adquisitivo de la población en comparación con el promedio nacional, lo que permite comprar convenientemente alimentos importados.

Los índices de disponibilidad de agua, energía y alimentos W-1, E-1, F-1 mostraron la misma tendencia para 2015, pero con diferencias en los índices W-3, F-2 y F-3. La sostenibilidad hídrica (W-3) disminuyó debido al mayor consumo de este recurso y una mayor participación de las importaciones de agua necesarias para atender las demandas. La sostenibilidad alimentaria (F-3) disminuyó debido al aumento de las importaciones de

alimentos al estado. En cuanto a la accesibilidad a la energía y el agua, los índices W-2 y E-2 aumentaron, pero en una proporción baja, como resultado de la correcta distribución de los hogares con acceso a los servicios.

Actualmente, la disponibilidad de energía (E-1) aumenta debido a la mayor producción de energía tanto de fuentes renovables como no renovables. Sin embargo, la sostenibilidad energética, alimentaria y hídrica continúa en riesgo en la región (E-3, F-3, W-3), registrando un déficit para 2015. El motivo es por una mayor participación de las importaciones y el insignificante aumento de la producción de energía no renovable. En comparación, los otros índices mostraron la misma tendencia que en años anteriores.

Las proyecciones para 2025 y 2030 muestran cambios significativos en algunos índices (Figura 9). Los principales factores son el aumento de población, el uso de fuentes de energía renovables, en consecuencia, la disponibilidad de energía, y, como aspecto negativo, la mayor participación de las importaciones, como el consumo excesivo de algunos recursos. La **Tabla 4.1** presenta la tasa de crecimiento anual (%) de 2013 a 2030. El signo más (+) significa un aumento y el signo menos (-) indica una disminución.

Tabla 4.1 Índices Según Tasa de Crecimiento Anual de 2013 a 2030.

	AGUA			ENERGÍA			ALIMENTOS		
	W-1	W-2	W-3	E-1	E-2	E-3	F-1	F-2	F-3
2015	-3.10	0.90	0.04	-147.20	0.93	39.55	0.00	4.62	-1.31
2019	-5.76	1.68	0.07	-1472.00	0.71	371.89	0.00	2.94	-2.99
2025	-8.79	0.31	0.54	0.40	0.35	7.33	0.00	4.29	-2.56
2030	-12.69	0.21	-0.44	2.08	0.25	61.38	0.00	3.19	-3.88

Para el cálculo del porcentaje de tasa de crecimiento se utilizó el enfoque lineal presentado en la **ecuación 77** (INEGI, 2019):

$$\% \Delta = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\% \tag{77}$$

Donde V_1 representa el valor del índice actual y V_0 representa el valor del índice pasado. La tasa de crecimiento anual (TCA) denota que los sectores de agua y alimentos de la región enfrentaron un escenario adverso debido a que las proyecciones de generación, consumo, disponibilidad y sostenibilidad de estos sectores estiman que la producción

disminuirá a partir de fuentes no renovables, pero que aumenta la generación a partir de fuentes renovables. En cambio, la demanda de agua y alimentos aumentará abruptamente debido al aumento de la población y la tendencia a la globalización. Debido a la inquietud y necesidad de lograr un desarrollo sustentable, es necesario incluir en el futuro las fuentes de energía renovable (eólica y solar), lo cual es de acuerdo con la Ley General de Cambio Climático que estableció el Gobierno Mexicano (INECC 2012). Además, para el año 2019, la población total del Estado de Nuevo León es de 5'374'471 habitantes, el consumo y generación de energía son de 159'551.84 GW-h y 88'353'814 GW-h, respectivamente. Para el año 2030, el Gobierno afirmó que la demanda de energía debe ser satisfecha en al menos un 40% a partir de fuentes renovables. Además, la proyección para el año 2030 indica que la población será aproximadamente de 5'916'236 habitantes, y de esta forma la generación y consumo de energía serán 96'305.65726 GW-h y 171'996.8835 GW-h, respectivamente.

Es fundamental entender este comportamiento y la aplicabilidad de esta herramienta porque se espera que para el 2030 las áreas urbanas alberguen al 60% de la población mundial, lo que significa que una de cada tres personas vivirá en ciudades. En México, esta cifra es aún mayor; alrededor del 83% de la población o cuatro de cada cinco mexicanos vivirán en ciudades para el 2030. La herramienta propuesta es un instrumento especialmente útil para analizar la seguridad del WEF, identificar la interrelación conceptual entre los nexos y visualizar la dirección a través de la proyección tiempo extraordinario. Estas observaciones y predicciones aportan elementos para tomar decisiones a medio y largo plazo. Asimismo, ayuda a realizar acciones preventivas, preparar programas de desarrollo para cada uno de los recursos, explotar los recursos de manera responsable, ser amigables con el medio ambiente y, en general, implementar una planificación estratégica sostenible.

4.2 RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA SEGURIDAD HÍDRICA-ENERGÉTICA-ALIMENTARIA

Un aspecto esencial para enfrentar las diversas adversidades en el área de estudio es la implementación de políticas que potencien el mejoramiento del desarrollo sostenible mediante el uso adecuado de los recursos. Existe vulnerabilidad de recursos en el Estado de Nuevo León por el crecimiento poblacional, explotación de fuentes de abastecimiento, cambio y variabilidad climática, falta de planificación de abastecimiento, infraestructura de riego, inversión para generación de energía a partir de fuentes renovables, entre otros.

El cambio y la variabilidad climáticos tienen un impacto sustancial en el sector del agua, ya que se espera que la temperatura promedio anual aumente junto con una reducción de las lluvias y los volúmenes en las fuentes de abastecimiento local, mientras que la demanda de agua crece. Eso afectará negativamente la disponibilidad de recursos hídricos superficiales y subterráneos en el área y respaldará la necesidad de importar agua de fuera de los límites del estado con posibles conflictos con los usuarios de agua vecinos. Por tanto, es fundamental abordar el impacto de la incertidumbre climática y gestionar de forma sostenible los recursos hídricos del estado.

Según la Estadística Nacional de Agua del Estado de Nuevo León, el 70% del consumo total de agua corresponde al sector agrícola (CONAGUA, 2018). Este alto porcentaje, junto con los niveles críticos de disponibilidad de agua, han impulsado la implementación de políticas para mejorar la seguridad hídrica en la región. Estas políticas integran una adecuada planificación de la inversión de capital orientada a la infraestructura y mantenimiento hidráulico. Además, incluye programas para promover el uso eficiente del agua, la recuperación de aguas residuales y la implementación de sistemas de baja presión y riego de alta eficiencia para cultivos como el sistema de riego por goteo. El ahorro de agua respecto a sistemas de riego como el riego por aspersión o manta es del 30 al 60% según las pruebas realizadas por el Grupo Regaber Matholding en El Carpio, Valladolid (2017).

En cuanto a las políticas energéticas, las condiciones geográficas y climáticas de México determinan que tenga un alto potencial para aprovechar las fuentes renovables para la generación de energía. El Consejo Nacional de Energía publicó el Programa Transitorio de Energía, donde el objetivo establecido en la Ley de Transición Energética para 2024 es

que el 35% de la electricidad generada sea a partir de recursos renovables (SENER, 2018). Asimismo, se espera que para el 2030 las energías renovables aporten el 40% de la energía consumida en el país para cumplir con lo establecido en la Ley General de Cambio Climático. En 2019, el Estado de Nuevo León generó el 30% de la energía eléctrica a partir de fuentes renovables (INECC, 2012). Esta iniciativa incrementará el valor del índice de sostenibilidad (E-3).

Se deben realizar una serie de actividades para lograr los objetivos mencionados anteriormente. Las estrategias incluyen la planificación de la matriz energética para las fuentes de energía renovable, el financiamiento de la investigación para el desarrollo científico y tecnológico y la inversión de capital. Asimismo, es necesaria la implementación de una política de Estado para la producción nacional de tecnologías, redes de almacenamiento, celdas fotovoltaicas, entre otras.

El sector alimentario tiene una gran importancia económica. Sin embargo, las condiciones climáticas y el cambio afectarán significativamente a la región sur del estado. Esta región depende principalmente de la producción de cultivos. El cambio climático y la variabilidad tendrán un impacto en las condiciones climáticas afectando drásticamente la productividad en la agricultura (CONAGUA, 2016). Las adaptaciones planificadas centralmente son la alteración de la superficie de siembra, cambio de cultivos, desajuste en la cosecha y fechas de siembra. Abordar este problema debe ser fundamental para el desarrollo sustentable del estado. La implementación de las acciones correspondientes contribuirá al uso eficiente de los recursos agrícolas, para mantener o incluso aumentar la capacidad actual.

El gobierno mexicano ha desarrollado programas de prevención donde se conserva, restaura y permite mitigar los gases de efecto invernadero el medio ambiente. El propósito de estas iniciativas es impulsar tecnologías para la reconversión de cultivos que mantengan el uso del suelo y el agua, evaluar la captura de carbono en el sector ganadero, monitorear los cambios territoriales de la vegetación, implementar mejores técnicas de riego y cultivo. El objetivo final es promover la conservación adecuada del suelo y el agua, mejorar las prácticas agrícolas y de reforestación (SAGARPA, 2013).

Con base en las consideraciones anteriores, en este estudio se propusieron diferentes escenarios para los años 2025 y 2030 que son favorables para los índices del sector agua, donde se implementa un sistema de riego por goteo para el sector agrícola con menor (30%), intermedio (45%) y eficiencias superiores (60%), para ahorrar agua. Asimismo, se verificó una reducción del 10% en el consumo residencial mediante la implementación de cambios en la política de uso del agua y tecnologías de reciclaje. Los resultados obtenidos de estos escenarios se presentan en la **Figura 4.3**. Si bien la brecha permanece, la disponibilidad de agua mejora para el 2030. El porcentaje de crecimiento del índice de disponibilidad en el sector del agua se puede observar en la **Tabla 4.2**. Para el sector de energía, el Cambio Climático La ley es una herramienta fundamental. En las proyecciones, ya se considera una transición energética a fuentes renovables. En el sector alimentario, es difícil mejorar los índices ya que depende principalmente de la tendencia de crecimiento poblacional, así como del comportamiento dietético de la población. El análisis que integra estas políticas arrojó cambios favorables en los índices del sector agua, obteniendo un aumento en el índice de sostenibilidad debido a una reducción significativa en la importación de agua. Cabe señalar que estas nuevas políticas compensan el déficit esperado. El índice de disponibilidad sigue teniendo un riesgo latente; sin embargo, su desempeño muestra un notable incremento debido a la disminución del consumo.

Tabla 4.2 Crecimiento Porcentual Anual del Índice de Disponibilidad del Sector del Agua con Reducción del Consumo de Agua en Agricultura y Uso Público.

Escenario	2025	2030
W-1 con 30% de reducción de agua en agricultura y 10% de reducción en uso doméstico	35.54	36.91
W-1 con 45% de reducción de agua en la agricultura y 10% de reducción en el uso doméstico	47.85	53.52
W-1 con 60% de reducción de agua en agricultura y 10% de reducción en uso doméstico	63.31	66.44

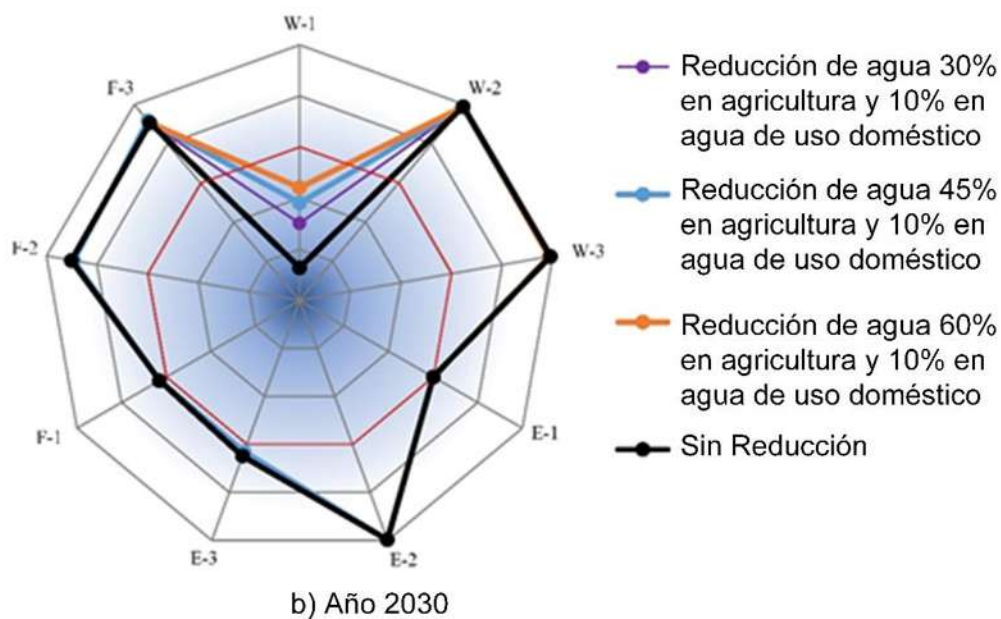
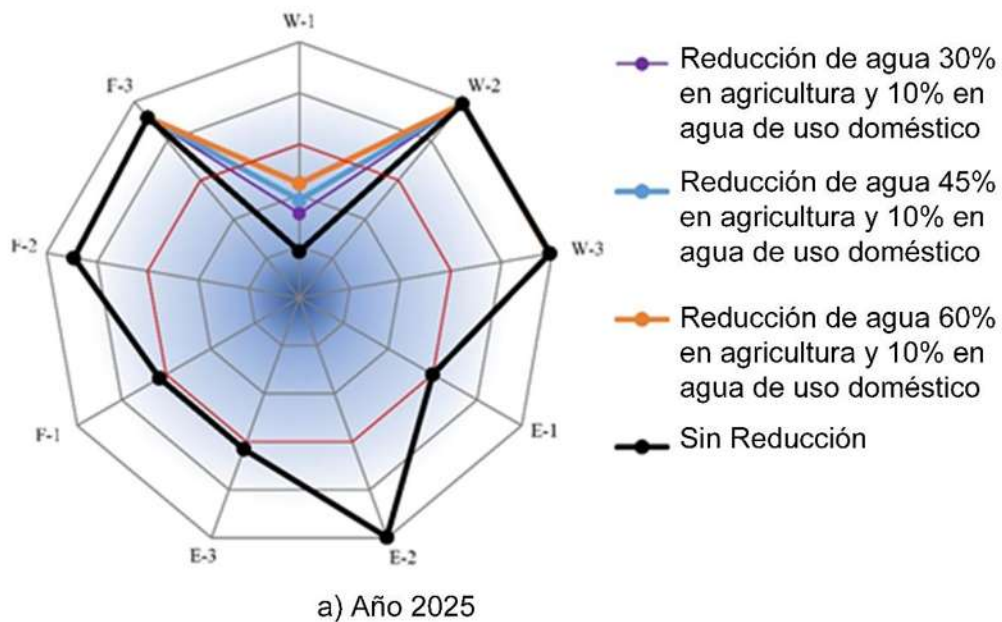


Figura 4.3 Escenarios Propuestos Para Índices Calculados con Reducción del Uso de Agua Agrícola y Doméstica. a) Año 2025, b) Año 2030.

4.3 EVALUACIÓN DE ÍNDICES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY

De forma esquemática, en la **Figura 4.4** se observa la producción y demanda de los tres sectores involucrados en el Nexo WEF para el Área Metropolitana de Monterrey. La producción de los recursos que conforman los sectores representa un riesgo de acuerdo con las cifras de consumo, complicando satisfacer las demandas de la población y permitir convertirse en una zona completamente disponible.

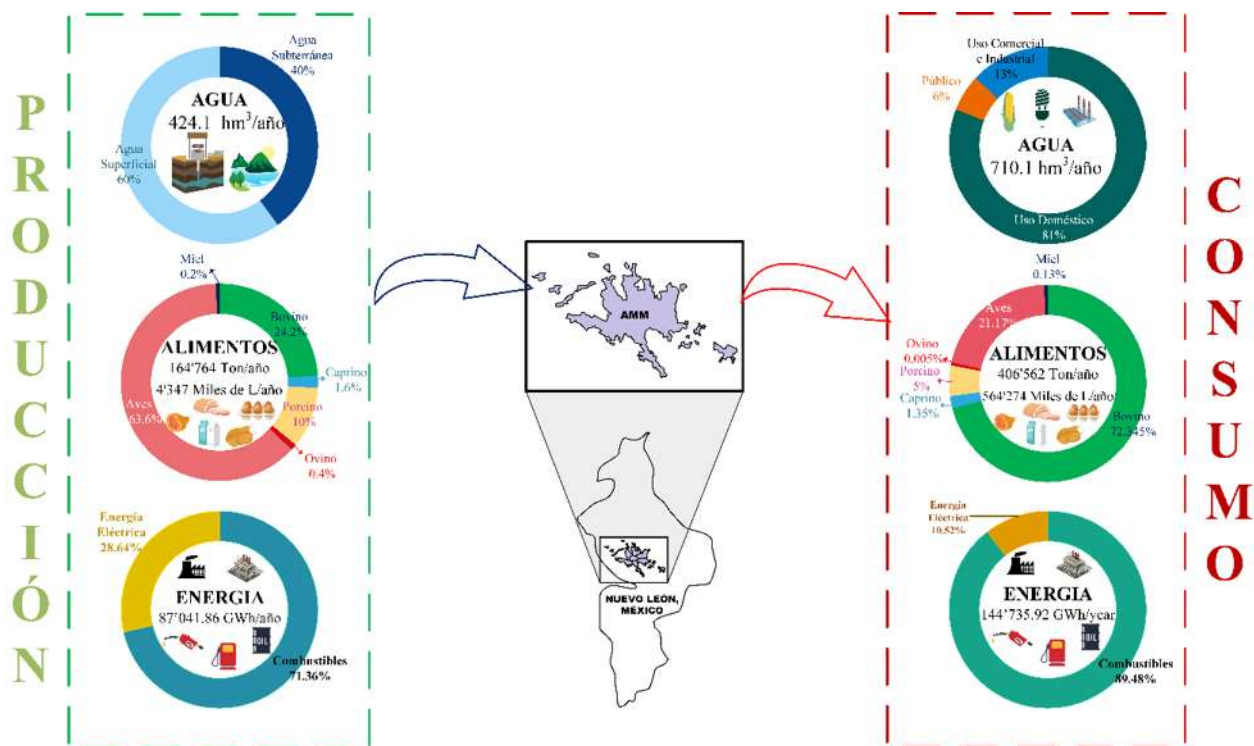


Figura 4.4 Flujos asociados al Nexo Agua-Energía-Alimentos en AMM.

En particular, para el Área o Zona Metropolitana de Monterrey (AMM), la evaluación de los índices del Nexo WEF se realizó a través de una gráfica de radar con nueve vértices, los datos utilizados para determinar el valor de los índices WEF se tomaron para el año 2019 siendo los más recientes disponibles. Estos índices están orientados hacia el sector hídrico, energético, alimenticio y denotan la disponibilidad, acceso y sostenibilidad de los recursos de estos sectores en la región estudiada.

En la **Figura 4.5** se muestran los resultados obtenidos de la evaluación de índices. El análisis de la gráfica de radar muestra que los parámetros de disponibilidad (W-1, E-1, F-1) en todos los sectores tanto hídrico, energético como alimenticio presentan un panorama fatídico, esto se resume a la explotación de los recursos en el AMM, ya que aproximadamente el 92% de la población está concentrada dentro de esta área en donde se encuentran las actividades económicas dando importancia a la región. En cambio, los parámetros de accesibilidad (W-2, E-2, F-2) para todos los sectores, presentan un escenario favorable esto debido a que la mayor parte de la población en el AMM tiene acceso a los recursos de agua, energía y alimentación, refiriéndose al correcto diseño de redes de distribución con las que cuenta la ciudad y la capacidad adquisitiva de su población. Sin embargo, los parámetros de sostenibilidad (W-3, E-3, F-3) muestran diferentes tendencias siendo la sostenibilidad hídrica y alimenticia (W-3, F-3) los índices que manifiestan tendencias favorables, en consecuencia, a la menor participación de las importaciones de recurso hídrico y alimenticio necesarios para cubrir las demandas de su población. En lo que respecta al índice de sostenibilidad energética (E-3) contrario a los anteriores manifiesta una tendencia negativa siendo un resultado fatídico, resultado de la baja participación de las fuentes de energía renovable en la generación de energía para satisfacer las demandas.

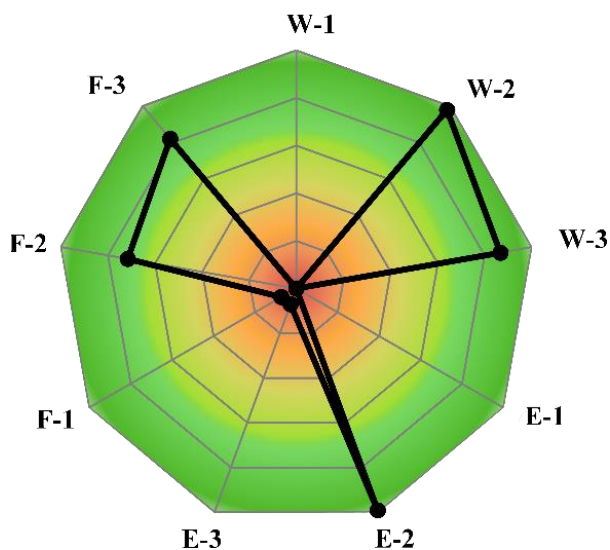


Figura 4.5 Evaluación de Índices WEF Para el Área Metropolitana de Monterrey en 2019.

El análisis respecto a la seguridad hídrica indica que el aspecto más preocupante es la disponibilidad de agua (W-1), lo cual a su vez pone en riesgo la producción de energía y alimentos (E-1, F-1). Las condiciones geográficas de la AMM y la trayectoria del humano han colocado en riesgo la disponibilidad de recursos, es especial en la disponibilidad del agua. Siendo en varias ocasiones las tormentas la salvación de la falta de recurso hídrico debido a intensas sequías registradas en la región analizada y consecuencia de catástrofes naturales, como son huracanes que azotan en la costa del estado vecino. Sin embargo, los esfuerzos realizados para lograr el acceso al recurso hídrico con su correcta distribución a través de un buen diseño en sus redes (W-2) han mostrado resultados satisfactorios ya que un porcentaje muy pequeño de usuarios aún continúa sin acceso al agua. Por otro lado, la sostenibilidad del agua (W-3) no se encuentra en riesgo en la AMM tomando como base la cantidad de agua que no es importada para satisfacer la demanda de los usuarios y consecuencia de lluvias presentes permitiendo abastecer fuentes superficiales y subterráneas.

Los resultados obtenidos referentes al sector energético demuestran que la AMM, pese a su importancia industrial y económica en el país, no cuenta con la capacidad requerida para generar la energía demanda en los distintos sectores productivos y doméstico. No obstante, los requerimientos energéticos se han logrado cumplir para garantizar el acceso de la población (E-2), razón por la cual la accesibilidad a la energía no se encuentra en riesgo. Sin embargo, cabe destacar que se debe promover la inserción de energías renovables como son eólica y solar en la AMM, ya que el índice de sostenibilidad (E-3) está amenazado por el desmesurado uso de combustibles fósiles.

Respecto a la seguridad del sector alimentario, los índices de accesibilidad (F-2) y sostenibilidad (F-3) muestran resultados con poco riesgo, en cambio, el índice de disponibilidad de alimentos (F-1) se encuentra en situación de alto riesgo, ya que la producción de los alimentos esenciales para una dieta saludable en la AMM no es suficiente para cumplir con los requerimientos necesarios de una persona nutrida, que a su vez se deriva de la capacidad adquisitiva en la población para adquirir alimentos chatarra sin valor nutricional. La disponibilidad en alimentos se encuentra en riesgo debido a diversos factores principalmente el uso de suelo, ya que el AMM es una zona caracterizada por gran cantidad industria manufacturera, además de escasez de agua y las condiciones climáticas que enfrenta

la región. Ante esta problemática, para cumplir con la demanda de alimentos de la población de la AMM es necesario la importación de alimentos de otras regiones del país, esto conlleva que se garantice el acceso de alimentos de valor nutricional a la mayor parte de la población; reduciendo la existencia de personas en situación de desnutrición (F-2). Las mejoras en el sector alimentario pueden promover la producción de alimentos para disminuir la dependencia de otras regiones para satisfacer los requerimientos alimenticios y nutricionales y de esa manera incrementar el índice de sostenibilidad (F-3).

De igual manera, se deben de implementar estrategias o políticas para mejorar los índices de seguridad del Nexo Agua-Energía-Alimentos, las cuales permitan hacer frente a cubrir las necesidades económicas, sociales y de un medio ambiente, sin poner en riesgo la satisfacción de las futuras generaciones

4.4 RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo de optimización consta de 9'743 variables continuas, 62 variables binarias, 4'540 ecuaciones y 10 relaciones no lineales, que corresponde a un problema MINLP, se codificó el software GAMS. El solucionador DICOPT se utilizó para resolver el problema MINLP, mientras que los solucionadores CONOPT y CPLEX se utilizaron para resolver los subproblemas lineales y no lineales. Se implementó una estrategia de inicialización, 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.

4.4.1 Resultados de Objetivos Individuales

La solución factible e individual de cada objetivo al modelo matemático propuesto se realizó mediante el análisis de tres escenarios correspondientes a los valores extremos, minimizando el costo total anual (TAC), el consumo de agua dulce (TotFreshW) y las emisiones de gases de efecto invernadero (TotGHGE). Los resultados de la minimización de cada función objetivo se presentan en la **Tabla 4.3**. La **Figura 4.6** muestra las soluciones para los escenarios evaluados, donde se pueden identificar los límites superiores (Punto Nadir) e inferior que conforman la solución óptima (Punto Utópico); recordando que el escenario mencionado en último lugar es infactible. Las configuraciones obtenidas se

presentan en diagramas de flujo que incluyen diferentes fuentes de agua y energía según cada escenario, y gráficos de radar que muestran la comparación entre los Índices de Seguridad del Nexo WEF evaluados para el año 2019 con parámetros obtenidos de Estadísticas del Agua en México (EAM, 2019) y los valores resultantes de los objetivos individuales.

Tabla 4.3 Resultados Principales Minimizando los Objetivos Individuales.

	MIN. TAC	MIN. TOTFRESHW	MIN. GHGE
<i>TAC (Millones USD / año)</i>	208'000	218'450	278'100
<i>TotW^{Fresh} (Hm³ / año)</i>	565.22	378.31	560.228
<i>TotGHGE (Millones ton / año)</i>	51'506.38	51'375.446	51'096.62
<i>IW (Hm³ / año)</i>	0	125.281	53.997
<i>TotWG (Hm³ / año)</i>	4'028.411	4'002.941	3'992.271
<i>TotW^{Foot} (Hm³ / año)</i>	565.221	565.221	565.221
<i>FreshW^{Dam-T} (Hm³ / año)</i>	565.221	239.088	478.31
<i>TotW^{Well} (Hm³ / año)</i>	0	13.94	27.921
<i>TotW^{HRW} (Hm³ / año)</i>	0	0.279	0
<i>TotW^{ID} (Hm³ / año)</i>	3.293	2.321	2.758
<i>TotW^{TGW} (Hm³ / año)</i>	0	185.116	4.993
<i>TotEC (GW - h / año)</i>	39'400	40'519.709	40'531.953
<i>TotE^{Foot} (GW - h / año)</i>	15'355.767	15'355.767	15'355.767
<i>TE^{RE} (GW - h / año)</i>	18'603.879	19'647.509	19659.753
<i>TE^{AG} (GW - h / año)</i>	2.341	2.005	12.305
<i>TE^{SP} (GW - h / año)</i>	18'601.718	19'645.504	19'657.449
<i>TE^{Biogas} (GW - h / año)</i>	147.699	147.942	147.139
<i>TE^{PP} (GW - h / año)</i>	88.35	11.774	11.774
<i>PumpingCost (Millones USD / año)</i>	5.555	64.7	16.872
<i>TotCapCost (Millones USD / año)</i>	111.886	120.151	168.567
<i>TotOptCost (Millones USD / año)</i>	208'000	218'430	217'790
<i>W - 1</i>	0.86	0.859	0.858
<i>W - 2</i>	0.969	0.969	0.969
<i>W - 3</i>	1	0.778	0.904
<i>E - 1</i>	0.611	0.913	0.621
<i>E - 2</i>	0.988	0.988	0.988
<i>E - 3</i>	0	0	0
<i>F - 1</i>	0.072	0.072	0.072
<i>F - 2</i>	0.7	0.7	0.7
<i>F - 3</i>	0.817	0.817	0.817

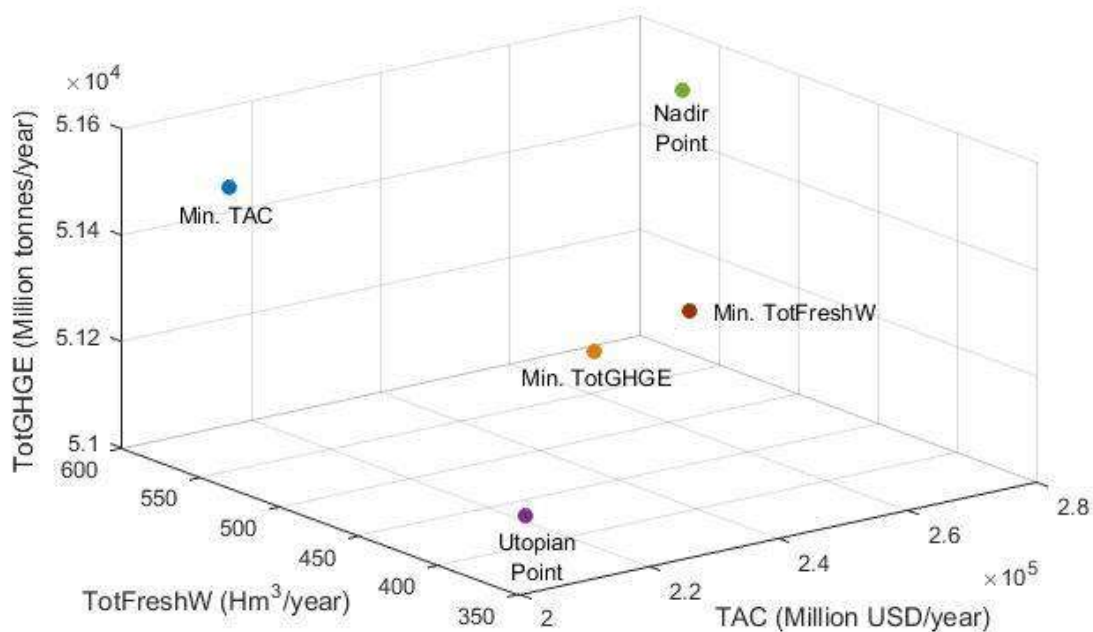


Figura 4.6 Representación de Objetivos Individuales Para el Caso de Estudio Abordado.

En general, los Índices de Seguridad del Nexo WEF de disponibilidad de agua y energía (W-1 y E-1) muestran mejoras significativas debido a la correcta gestión de los recursos. Con referencia al sector de alimentos (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 solo asegura la cantidad de agua concesionada proveniente de represas 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 estos índices se muestra porque refleja la situación actual del sistema y el modelo propuesto se puede adaptar para incluir como variables manipuladas para su optimización en trabajos futuros. En todos los escenarios propuestos, el agua de fuentes superficiales (presas y pozos subterráneos) se selecciona teniendo en cuenta los niveles de operación de cada presa y pozo, así como el suministro río arriba y las precipitaciones presentes en el área. Solo para el escenario de los costos anuales totales mínimos, se considera el uso de agua exportada de fuentes fuera del área de estudio. La implementación de colectores de agua de lluvia solo se utiliza en el escenario correspondiente para minimizar el consumo de agua dulce. El uso de agua gris tratada no se

usa en el escenario minimizando los costos totales anuales. Para la generación de energía, en todos los escenarios se selecciona la planta de biogás para cubrir las demandas de alumbrado público y el sistema de metro colectivo AMM. En cuanto a los costos asociados, en todos los escenarios el mayor costo generado corresponde a los costos de operación de mantenimiento (TotCapCost).

En el escenario de minimización del costo total anual (TAC), el sistema genera un valor de 208'000 Millones de USD/año (ver **Figura 4.7**), obteniendo un incremento aproximado del 9% frente a los escenarios que minimizan el consumo de agua dulce y las emisiones de gases de efecto invernadero. Los costes que más influyen en la optimización están asociados a los costes de operación y mantenimiento, que representan el 99.9% del TAC. Los costos de operación y mantenimiento están compuestos por los costos de operación y mantenimiento de cada una de las unidades seleccionadas. En este escenario, existe una generación de energía por paneles solares de aproximadamente 18'601.718 GW-h/año, por lo que esta tecnología aporta el 95,84% del costo total de operación y mantenimiento, seguida de la energía generada en la planta de biogás, centrales eléctricas y, en menor medida, energía eólica a través de aerogeneradores. La principal inversión en este escenario es la implementación de paneles solares para la generación de energía durante todo el año debido al clima semiárido que presenta el caso de estudio. La generación de energía está compuesta por 98,73% de paneles solares, a través de una planta de biogás 0,78%, plantas de ciclo combinado 0,47% y el restante (0,02%) por turbinas eólicas, con una generación de 51.506,38 millones de toneladas anuales de gases de efecto invernadero. El consumo de agua se satisface al 100% con agua de presas.

En el caso del consumo mínimo de agua dulce (TotFreshW), la red consume 378.31 Hm³ al año, (ver **Figura 4.8**), aumentando un 49% en los dos escenarios restantes. Para lograr el uso mínimo de agua dulce y la satisfacción de las necesidades hídricas, el modelo propone la implementación de colectores de agua de lluvia y el uso de aguas grises tratadas. La distribución del agua es 42,5% agua de presa, 32,75% agua tratada, 22,2% agua importada, 2,5% agua de pozo y 0,05% agua de lluvia recogida. En cuanto a la energía, este escenario propone la generación de energía solar en un 98,5% y en menor medida energía de la planta de biogás, centrales eléctricas y energía eólica. Aunque la mayor parte de la energía se

produce a partir de fuentes renovables, eso no significa que no haya emisiones de gases de efecto invernadero. El 1,5% de la energía generada en la planta de biogás existente es suficiente para emitir 51'375 millones de toneladas de gases de efecto invernadero. El costo anual total de esta configuración es de 218'450 millones de dólares. La inversión en este escenario solo corresponde al 0.01% del costo total del sistema, por lo que el costo total anual está casi completamente asociado a los costos de operación y mantenimiento, y los costos más altos están asociados con la implementación de paneles solares y la generación de energía en la planta de biogás, respectivamente.

Minimizando las emisiones de gases de efecto invernadero se obtuvo una solución con 51'096.62 millones de toneladas anuales (ver **Figura 4.9**), el 99.19% de la energía que se genera para la población es de fuente renovable, de la cual la mayoría es en paneles solares y en menor medida en aerogeneradores. Si bien en este escenario el objetivo general es minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, existe la participación de la generación de energía a partir de fuentes no renovables como la planta de biogás y la central eléctrica, lo que incide directamente en el costo total anual de 278.1 mil millones de dólares. Este escenario corresponde al más caro analizado. Una vez más, los costos de operación y mantenimiento son mucho más altos que el costo de inversión en nuevas tecnologías, la razón principal son los paneles solares. Las demandas de agua están cubiertas por el 84.6% del agua superficial, el 9.6% del agua importada fuera del área estudiada y en menor medida el agua subterránea. En este escenario no se incluye la implementación de colectores de agua de lluvia.

4.4.2 Resultados de Optimización de Índices de Seguridad

El enfoque presentado en su primera etapa solo evalúa los índices de seguridad sobre la base de objetivos individuales optimizados. Los índices que miden la accesibilidad de los tres sectores (agua, energía y alimentos) y los restantes índices de alimentos (disponibilidad y sustentabilidad), se mantienen constantes porque el modelo no incluye variables de insumo para optimizar estos temas, lo cual está asociado a la complejidad involucrada.

La disponibilidad de agua (F-1) en los tres objetivos individuales se mejoró drásticamente dando seguridad en este aspecto, el motivo principal está asociado al correcto uso y distribución del recurso hídrico. La cantidad de agua generada es mayor que el agua

consumida por la población porque se tiene en cuenta el agua contenida en presas, sistemas de pozos, implementación de colectores de agua de lluvia y las aguas residuales que pueden ser tratadas para satisfacer algunas demandas. La sostenibilidad del agua (W-3) alcanza su máxima seguridad (100%) al minimizar el costo total anual, ya que en esta configuración no se requiere utilizar agua de otras localidades para satisfacer las demandas del caso de estudio. Cuando se minimizan las emisiones de gases de efecto invernadero, los índices de seguridad también aumentan debido a la baja participación de agua importada. Si bien se minimiza el consumo de agua dulce, hay una disminución del 6% en la seguridad para la sostenibilidad del agua debido a una mayor dependencia del agua importada.

La disponibilidad de energía (E-1) muestra una mayor seguridad para el escenario en el que se minimiza el consumo de agua dulce, llegando casi al 100%. Y aunque el índice aumenta para los dos escenarios restantes, solo se alcanza aproximadamente en un 60%, por lo que este aspecto debería mejorar aún más. La variable decisiva en este índice corresponde a la capacidad de generar energía a partir de las tecnologías seleccionadas. No se tiene en cuenta la energía generada, sino la cantidad de energía máxima que se puede generar a partir de las capacidades instaladas. Uno de los conceptos más complicados de evaluar es la sostenibilidad energética (E-3). La conceptualización de este índice es que el servicio se pueda mantener durante un tiempo determinado sin agotar los recursos. Los resultados muestran seguridad nula porque la capacidad energética es analizada por fuentes no renovables, y en todas las configuraciones existe la implementación de paneles solares. La elección de los paneles solares incide directamente en los costes totales anuales, y en general este aspecto se puede mejorar para cubrir las necesidades actuales pero comprometiendo la capacidad de las generaciones futuras, incluso con un equilibrio entre crecimiento económico, medio ambiente y bienestar de la sociedad.

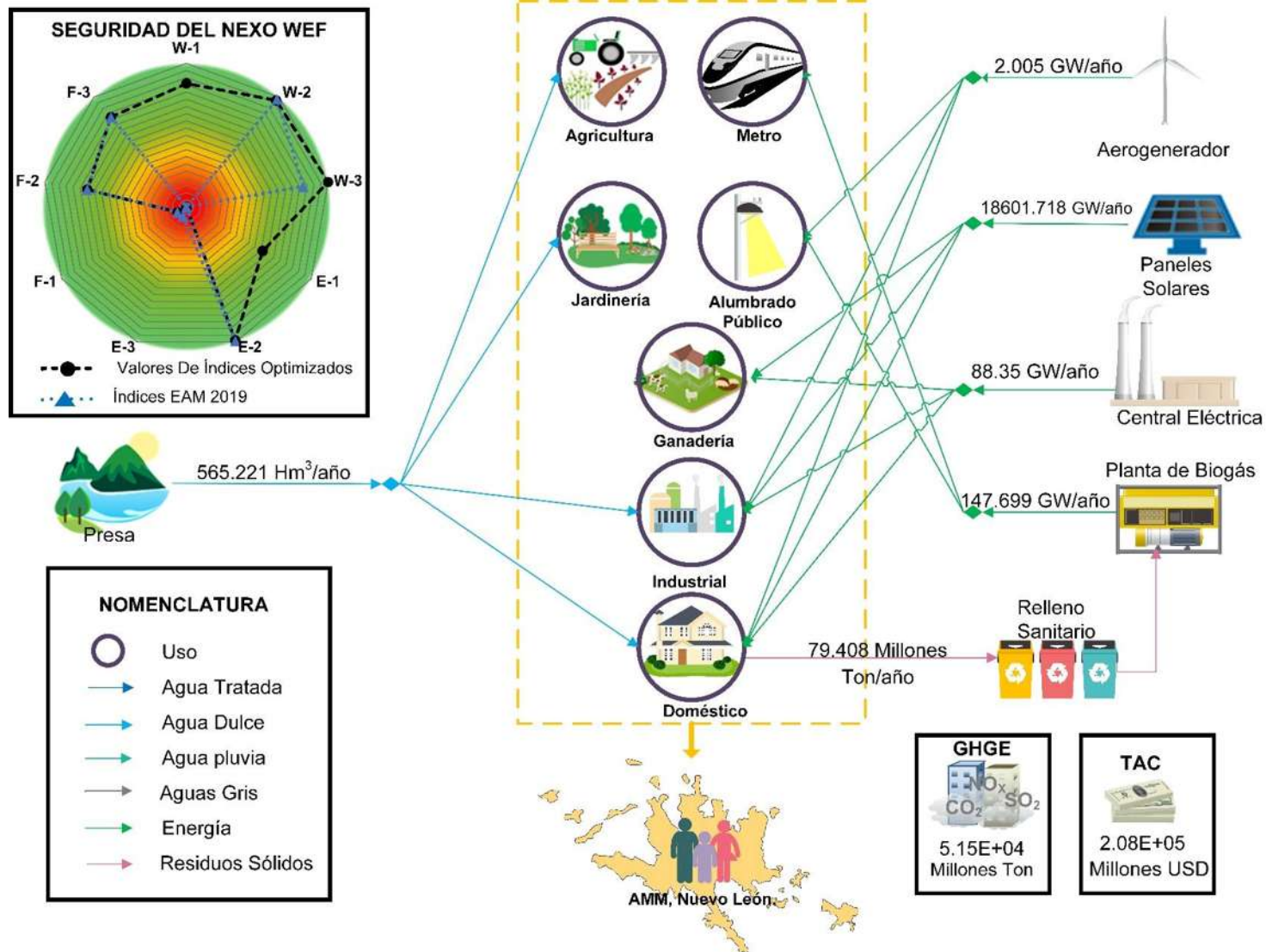


Figura 4.7 Solución Minimizando el Costo Total Anual (TAC).

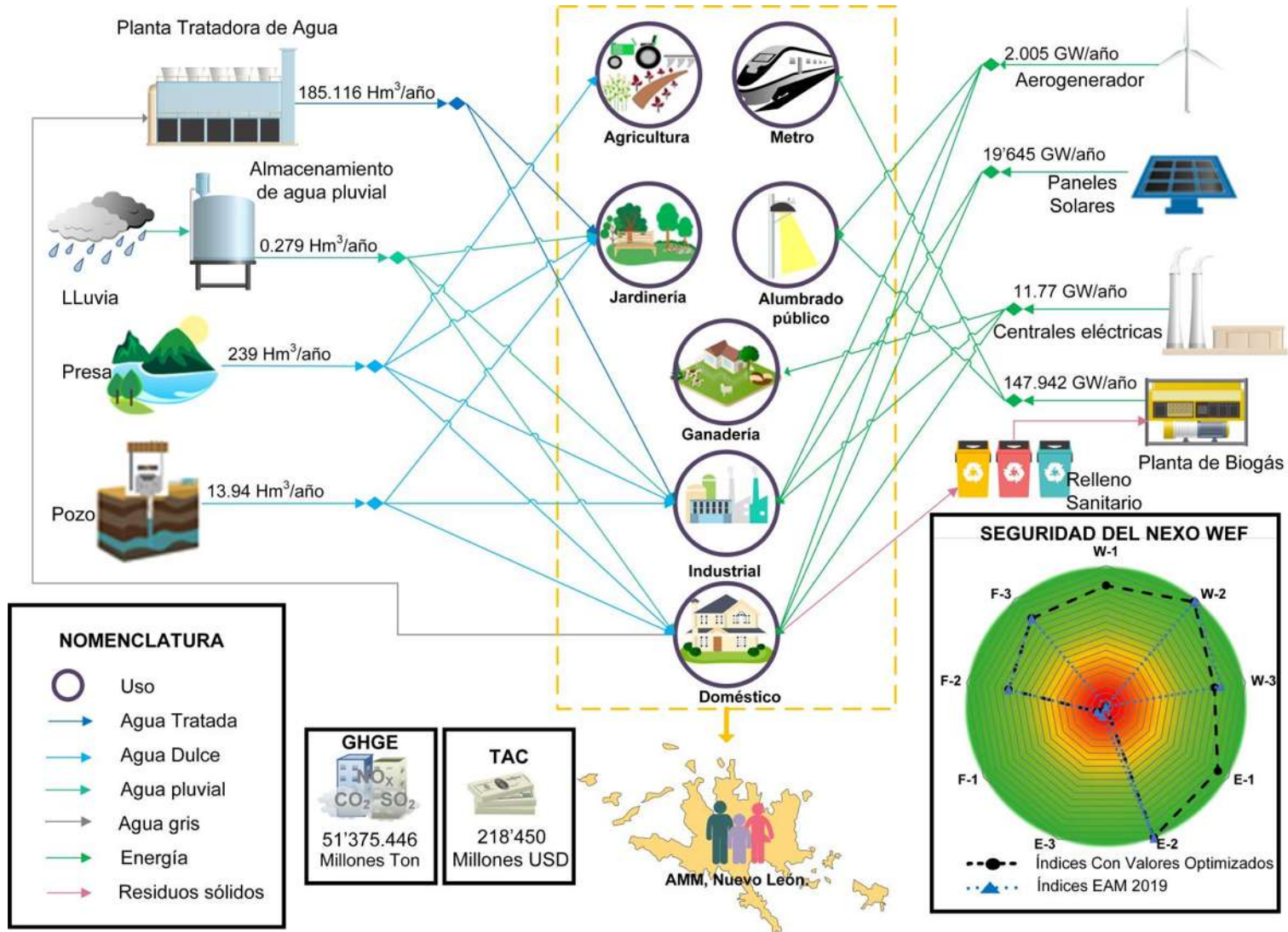


Figura 4.8 Solución que Minimiza el Consumo Total de Agua Dulce (TotFreshW).

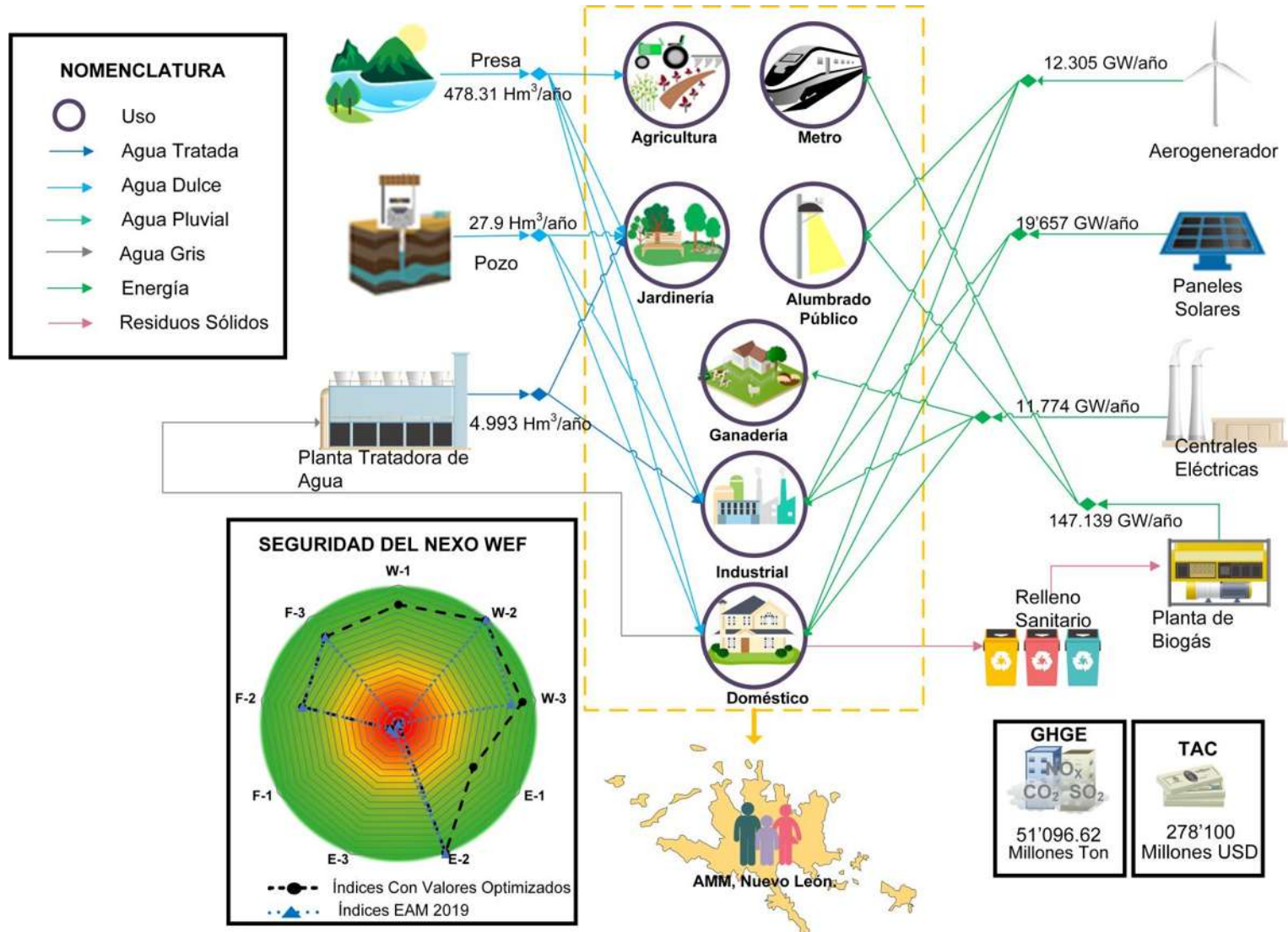


Figura 4.9 Solución Minimizando las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (TotGHGE).

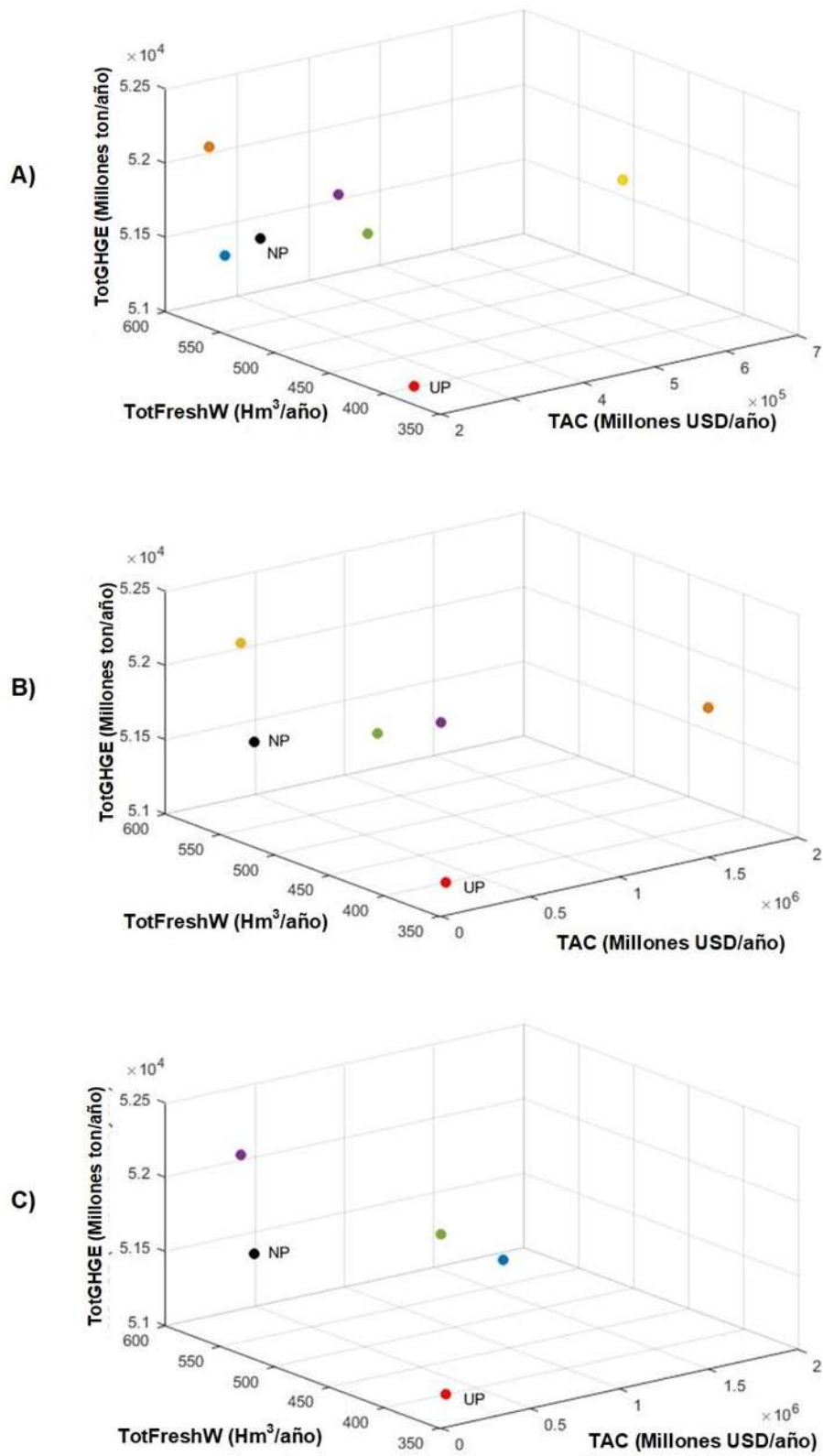


Figura 4.10 Soluciones Factibles de Multi-stakeholder: A) Min TAC, B) Min TotFreshW, C) Min TotGHGE.

Tabla 4.4 Resultados del Análisis de Multi-stakeholder.

PESOS STAKEHOLDER					ÍNDICES DE SEGURIDAD DEL NEXO WEF									OBJETIVOS		
CASO	W-1	W-3	E-1	E-3	W-1	W-2	W-3	E-1	E-2	E-3	F-1	F-2	F-3	TAC (Millones USD/año)	TotFRESHW (Hm ³ /año)	TotGHGE (Millones toneladas/año)
PUNTO UTÓPICO														207'670	378.31	51'096.62
PUNTO NADIR														278'100	565.221	51'506.382
MINIMIZANDO TAC																
1	1	0	0	0	0.967	0.969	0.952	0.611	0.988	0	0.072	0.7	0.817	207'750	551.297	51'506.382
3	0	0	0	1	0.86	0.969	1	0.611	0.988	0	0.072	0.7	0.817	207'700	565.221	52'195.524
12	0.1	0.25	0.625	0.025	0.967	0.969	1	0.8	0.988	0	0.072	0.7	0.817	606'090	448.185	51'876.408
13	0.025	0.1	0.25	0.625	0.967	0.969	1	0.611	0.988	0	0.072	0.7	0.817	208'400	448.185	52'195.524
22	100	15	40	5	0.967	0.969	1	0.646	0.988	0	0.072	0.7	0.817	249'380	448.185	51'893.962
MINIMIZANDO TOTFRESHW																
1	1	0	0	0	0.967	0.969	0.799	0.913	0.988	0	0.072	0.7	0.817	1'673'000	378.31	51'880.796
6	0	0.5	0.5	0	0.859	0.969	1	0.913	0.988	0	0.072	0.7	0.817	1'673'000	378.31	51'880.796
10	0.5	0	0.25	0.25	0.967	0.969	0.835	0.611	0.988	0	0.072	0.7	0.817	207'770	565.221	52'195.524
12	0.1	0.25	0.625	0.025	0.967	0.969	1	0.8	0.988	0	0.072	0.7	0.817	606'090	448.185	51'876.408
22	100	15	40	5	0.967	0.969	1	0.646	0.988	0	0.072	0.7	0.817	249'380	448.185	51'893.962
MINIMIZANDO TOTGHGE																
1	1	0	0	0	0.967	0.969	0.885	0.913	0.988	0	0.072	0.7	0.817	1'672'400	565.179	51'096.62
3	0	0	1	0	0.937	0.969	0.885	0.913	0.988	0	0.072	0.7	0.817	1'672'300	565.221	51'096.62
7	0	0	0.5	0.5	0.903	0.969	0	0.611	0.988	0	0.072	0.7	0.817	207'820	565.221	52'195.524
10	0.5	0	0.25	0.25	0.967	0.969	0.835	0.611	0.988	0	0.072	0.7	0.817	207'770	565.221	52'195.524
12	0.1	0.25	0.625	0.025	0.967	0.969	1	0.8	0.988	0	0.072	0.7	0.817	606'090	448.185	51'876.408

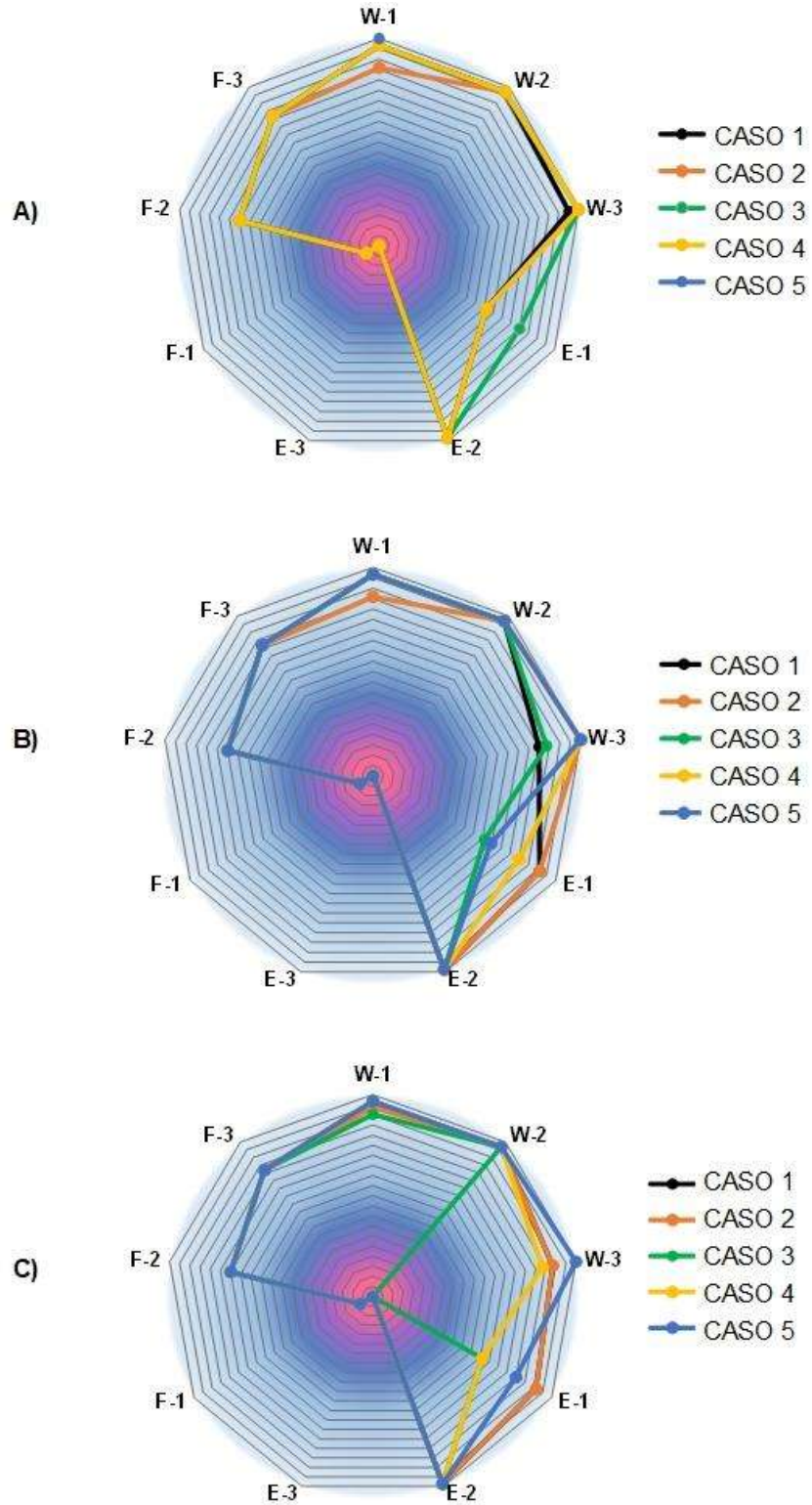


Figura 4.11 Índices de Seguridad de Nexo WEF: A) Min TAC, B) Min TotFreshW, C) Min TotGHGE.

Por otro lado, dado que los objetivos están en conflicto para ser satisfechos, y estos a su vez están completamente vinculados a la evaluación de los Índices de Seguridad del Nexo WEF, la solución multiobjetivo se llevó a cabo a través del enfoque stakeholder propuesto. La metodología de este enfoque permitió encontrar soluciones viables a través de un único objetivo. Los pesos (w) fueron asignados aleatoriamente para formar un conjunto de Pareto, estos pesos representan prioridades a los objetivos a ser satisfechos con el objetivo de crear una superficie de respuesta para determinar el comportamiento de las funciones independientemente de su magnitud (ver **Figura 4.10**). Debido a la complejidad de resolver un modelo MINLP complejo no convexo, en este trabajo se implementa el siguiente enfoque. La primera etapa involucra todas las tecnologías y fuentes que se utilizarán para satisfacer las demandas, lo que corresponde a un problema de MIP. El segundo considera la parte no convexa del problema y es el modelo que involucra la evaluación y optimización de los Índices de Seguridad. Así, la primera etapa sirve como punto de partida para un valor inicial y permite la optimización de la segunda etapa dentro de nuestra limitada área de búsqueda determinada en la etapa anterior. Por ello, se crearon diferentes casos para la optimización de los Índices de Seguridad que primero implican minimizar cada uno de los objetivos (TAC, TotFreshW y TotGHGE). Los resultados del enfoque stakeholder se encuentran en la **Tabla 4.4**, que muestra los pesos aleatorios asignados y los objetivos obtenidos. Los Índices de Seguridad del Nexo WEF se muestran en gráficos de radar en la **Figura 4.11**, cada vértice representa un índice evaluado, y a medida que se acercan a ellos, la solución representa una mayor seguridad del recurso.

4.5 RESULTADOS DE RESILIENCIA ANTE CATÁSTROFES NATURALES

Para evaluar los resultados del AMM, se implementó la metodología propuesta. En las **Figura 4.12** se muestra la matriz tridimensional del AMM. Los servicios funcionales de agua (m³), energía (MW) y alimentos (Toneladas) para los estudios de caso se presentan a través de la matriz. Se seleccionaron cinco años diferentes y los posibles modos de falla son huracanes, baja temperatura y sequía.

Food	1,195,117	1,275,160	1,406,085	1,579,804	1,760,536	
	1,195,117	1,275,160	1,406,085	1,579,804	1,760,536	
	1,195,117	1,275,160	1,406,085	1,579,804	1,760,536	
Energy	139,615	145,594	159,552	165,886	171,997	
	139,615	145,594	159,552	165,886	171,997	
	139,615	145,594	159,552	165,886	171,997	
Water	2,067,300	2,069,000	2,149,000	2,236,688	2,366,724	Hurricane Low temp. Drought
	2,067,300	2,069,000	2,149,000	2,236,688	2,366,724	
	2,067,300	2,069,000	2,149,000	2,236,688	2,366,724	
	2013	2015	2019	2025	2030	
Period of time						

Figura 4.12 Matriz Tridimensional Para el Caso de Estudio de AMM.

Luego, cada uno de los servicios funcionales se multiplicó por el respectivo costo de penalización (**Tabla 4.5**) para construir la matriz dimensional. Para el caso de estudio se puede observar que los servicios funcionales varían a lo largo de los años, sin embargo, son los mismos para cada uno de los posibles modos de falla. Debido a esto, se utilizó un índice de riesgo asociado a cada uno de los posibles modos de falla. Los índices se calcularon con base en las metodologías establecidas por CENAPRED.

Tabla 4.5 Costos de penalización por Nexa Agua-Energía-Alimentos en diferentes años.

c	Ciudad	Costo (\$US/unidad)		
		Agua (m ³)	Energía (MW)	Alimentos (Ton)
2013	Monterrey	0.643	47.0	278.0
2015	Monterrey	0.724	48.8	289.5
2019	Monterrey	0.809	47.8	335.0
2025	Monterrey	0.891	34.1	357.8
2030	Monterrey	0.974	29.5	386.3

Tabla 4.6 Matriz Bidimensional del AMM.

Monterrey					Catástrofe
2013	2015	2019	2025	2030	
340,133,705	377,761,763	480,403,602	572,902,791	687,474,157	Sequía
340,133,705	377,761,763	480,403,602	572,902,791	687,474,157	Bajas Temperaturas
340,133,705	377,761,763	480,403,602	572,902,791	687,474,157	Huracán

De acuerdo con la metodología con la que se calcularon los índices, los niveles de riesgo no varían significativamente en los años propuestos (Tabla 4.6), así como en las proyecciones para años futuros. Por tanto, el índice de riesgo de cada uno de los estudios de caso de cada posible fallo es el mismo a lo largo de todos los años. Estos índices se muestran en las Figura 4.13, donde VL es un riesgo muy bajo, L es un riesgo bajo, M un riesgo medio, H un riesgo alto y VH un riesgo muy alto.

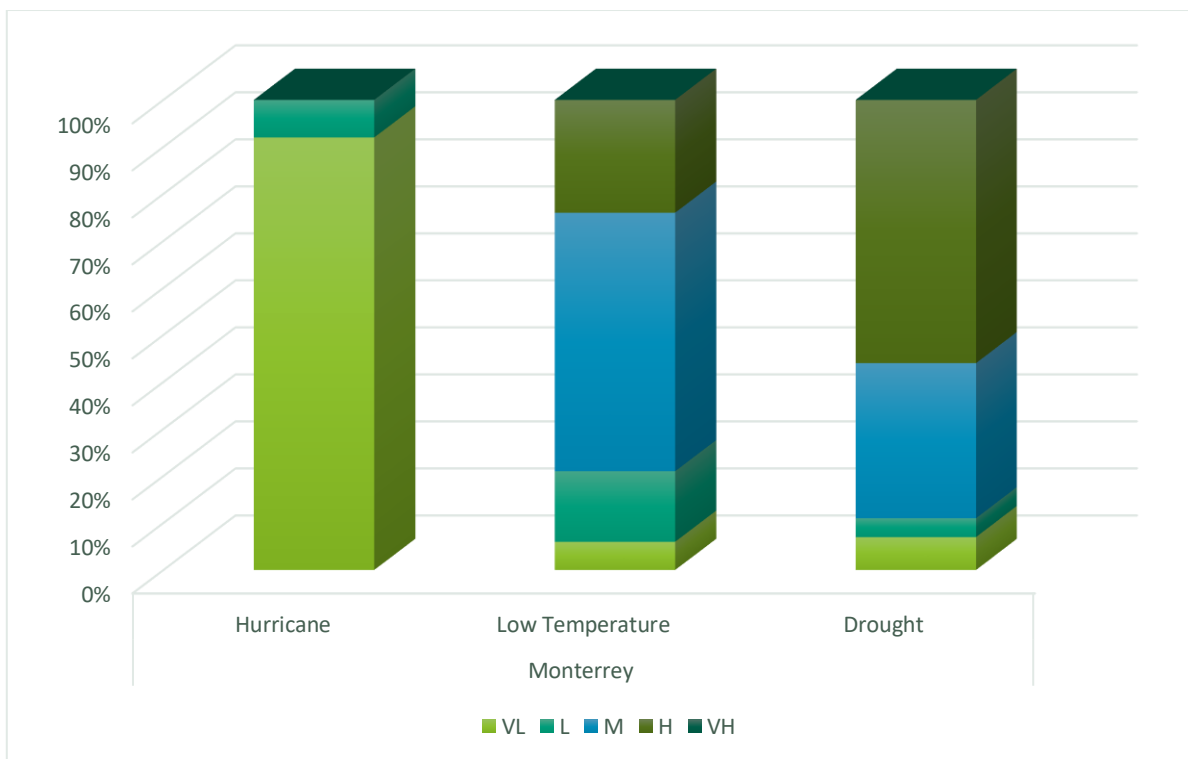


Figura 4.13 Índices de Riesgo Para AMM.

Posteriormente, se calcularon los índices de resiliencia para cada uno de los casos de estudio. Como los índices de riesgo no varían a lo largo de los años seleccionados, solo se calculó una matriz de resiliencia para el caso de estudio. Solo se consideran riesgos de nivel medio a muy alto. La **Tabla 4.7** muestra valores altos de resiliencia para el caso de un huracán, lo que nos dice que esta ciudad no presentaría ningún problema en el hogar si ocurriera alguno. Sin embargo, debido a que la ocurrencia de bajas temperaturas o alguna sequía, existen valores por debajo de la mitad, lo que indica que estos fenómenos pueden alterar drásticamente la producción de alimentos y/o energía, así como la disponibilidad de agua en esta zona.

Tabla 4.7 Índices de resiliencia en AMM.

	Monterrey				
	VL	L	M	H	VH
Huracán	0.08	0.92	1.00	1.00	1.00
Bajas Temperaturas	0.94	0.85	0.45	0.76	1.00
Sequías	0.93	0.96	0.67	0.44	1.00

CONCLUSIONES

En este siglo, la demanda mundial de recursos naturales es más urgente que nunca. Por lo tanto, es crucial asegurar el suministro de estos recursos interrelacionados fortaleciendo las sinergias y reduciendo las compensaciones entre estos sectores utilizando el enfoque del nexo del WEF. El desarrollo de herramientas permite determinar el estado actual del nexo WEF de un área o región y proyecciones futuras que apoyen decisiones a mediano y largo plazo para lograr un desarrollo sostenible.

En este trabajo se ha propuesto un enfoque de optimización multiobjetivo para diseñar redes de distribución de agua y energía en un área específica logrando seguridad en el nexo WEF, monitoreando la disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de los recursos; así como la resiliencia del sistema de distribución ante catástrofes naturales. Se ha presentado una superestructura que incluye diferentes tecnologías para la generación de energía y fuentes para la obtención de agua. Dentro de la generación de energía se propone el uso de centrales de ciclo combinado, una planta de biogás que opere con residuos sólidos y la incorporación de energías limpias (solar y eólica). En el caso de la obtención de agua dulce, se ha propuesto un enfoque integrado para el aprovechamiento de agua de fuentes superficiales (presas) y subterráneas, captación de agua de lluvia y tratamiento de aguas residuales, considerando sus límites máximos y mínimos de operación. Todas las tecnologías integradas mencionadas anteriormente fueron modeladas mediante un modelo MINLP para su simulación y optimización, sin dejar de lado los aspectos económicos y ambientales. El modelo matemático propuesto es de carácter general y puede ser aplicable a cualquier área que tenga características similares.

En este estudio se ha desarrollado un nuevo enfoque para evaluar la seguridad hídrica, energética y alimentaria en una zona con condiciones áridas y semiáridas. Se basa en un sistema de índice compuesto representado como un gráfico de radar que tiene en cuenta la evaluación de la disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de cada uno de los tres recursos. El enfoque se aplicó en el estado de Nuevo León, México, con una de las tendencias de urbanización y desarrollo más altas del país, con foco en el AMM. Esta es una región semiárida ubicada en el noreste de México, y es importante por su aporte al PIB Nacional y

su acelerado crecimiento poblacional, sus recursos sufren sobreexplotación, poniendo en riesgo la seguridad hídrica, energética y alimentaria. El Estado de Nuevo León en México se caracteriza por un clima semiárido asociado a la ubicación geográfica del estado, además este clima severo junto con la escasez de agua y el tipo de suelo limitan significativamente las actividades agrícolas. Además, la ubicación geográfica de la AMM empeora lo anterior, ya que presenta tendencia a sufrir desastres naturales como sequías e inundaciones.

Los resultados del análisis de Seguridad del Nexo WEF muestran que existe un alto nivel de seguridad en los índices de acceso al agua, energía y alimentos como resultado de la correcta distribución, diseño de redes y poder adquisitivo del Estado. Los índices restantes en cuanto a disponibilidad y sostenibilidad de los recursos se encuentran en desempeño deficitario. Esto se debe principalmente a las condiciones climáticas adversas y una alta dependencia de los recursos hídricos y alimentarios importados. El sector energético es el único que puede satisfacer las demandas, porque la producción local supera con creces al mercado local, incluso con una participación del 30% de energía procedente de fuentes renovables.

El sector alimentario es sumamente difícil de abordar, el modelo matemático no incluye la optimización de este sector por la complejidad que representa. El diseño de redes de distribución de agua satisface la demanda de agua necesaria para el sector agrícola. A pesar de la alta dependencia de las importaciones de alimentos, el riesgo es posiblemente menor que en comparación con el cultivo de los productos necesarios y la cría de ganado debido al clima seco que prevalece en el langostino estatal a las sequías recurrentes. El clima característico de la región permite que únicamente sea posible la cosecha de productos como sorgo forrajero, pastos y praderas, nueces y maíz, siendo la actividad agrícola incapaz de abastecer todos los grupos alimenticios a la población, además de inviable. La actividad ganadera local no satisface la demanda de consumo de carne, leche y huevos. Además, con un Índice de Desarrollo Humano del estado alto (0.88) el poder adquisitivo relativamente alto de la población hace que la importación de alimentos sea asequible. Se observa que la proporción de desnutrición y obesidad es relativamente grande en el estado, principalmente debido a hábitos alimentarios poco saludables y estilo de vida inactivo.

La alta dependencia de las importaciones de agua posiblemente representa el riesgo más importante ya que genera situaciones de estrés recurrentes y conflictos potenciales con los usuarios agrícolas competidores del estado vecino durante los períodos de sequía. El cambio y la variabilidad climáticos en combinación con el rápido crecimiento de la población pueden exacerbar esta situación en un futuro próximo. Por tanto, es necesario recurrir a estrategias de conservación de los recursos hídricos. De acuerdo con nuestras estimaciones, los programas de ahorro de agua en el uso doméstico y agrícola pueden aliviar la crisis del agua, es decir, cambiar los patrones de consumo en los hogares, aumentar el reciclaje y reutilización del agua tratada, mejorar la eficiencia del riego, controlar la presión en las redes, entre otros. Este enfoque para evaluar la seguridad del WEF se puede aplicar a otras regiones con escasez de agua.

Por otra parte, los resultados de la optimización y simulación muestran que es posible obtener la Seguridad del Nexo WEF logrando un desarrollo sostenible asegurando recursos para las generaciones futuras sin poner en riesgo la actual. En general, las variaciones en los índices se observan en el sector energético, afectando directamente el costo total anual y las emisiones de gases de efecto invernadero. La sostenibilidad de la energía en todos los escenarios analizados registra un gran riesgo. La selección de fuentes de abastecimiento de agua no muestra mayor relevancia para la evaluación de índices; sin embargo, el uso correcto de los recursos y el diseño e inserción de políticas podría mejorarlos. Es importante señalar que en todos los escenarios analizados, las demandas de agua y energía para uso doméstico, industrial, jardinería, alumbrado público, metro y agricultura fueron 100% satisfechas.

Las catástrofes naturales fueron abordadas por medio de índices que miden la resiliencia ante el paro de cualquier sistema (agua, energía y alimentos) ante diferentes circunstancias, como sequías, bajas temperaturas y huracanes que puedan afectar el área de estudio. Los índices involucran costos de penalización a cada servicio funcional. Los resultados muestran que para el AMM este tipo de catástrofes representan un riesgo menor para el abastecimiento de los recursos. Sin embargo, debido a la ocurrencia de bajas temperaturas o alguna sequía, existen valores por debajo de la mitad, lo que indica que estos fenómenos pueden alterar drásticamente la producción de alimentos y/o energía, así como la disponibilidad de agua en esta zona.

Finalmente, en el **Apéndice A** se muestran las publicaciones logradas, resultado de la investigación realizada durante el trabajo de tesis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Barajas, I., Mahlknecht, J., Kaledin, J., Kjellén, M., Mejía-Betancourt, A. (2015) Water and cities in Latin America: challenges for sustainable development. Routledge
- Al-Jayyousi, O. R. (2003) Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, 156 (1–3), 181–192. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00340-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00340-0)
- Arnfield, J.A. (2003) Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*. 23: 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Arthur, M., Liu, G., Hao, Y., Zhang, L., Liang, S., Asamoah, E. F., Lombardi, G. V. (2019). Urban food-energy-water nexus indicators: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104481>
- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P. S. J.-Tol R., K.-Yumkella, K., (2011) Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*. 39, 7896–7906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2015) Indicadores de Riesgo de Desastre y de Gestión de Riesgos. <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15443/indicadores-de-riesgo-de-desastre-y-de-gestion-de-riesgos-programa-para-america>.
- Bellfield, Helen (2015) Water, Energy and Food Security Nexus in Latin America and the Caribbean. Trade-offs, Strategic Priorities and Entry Points, Global Canopy Programme.
- BENLESA, Seisa Energy. Bioenergía de Nuevo León, S.A. de C.V., <https://www.seisaenergia.com/>.
- Biggs, E. M., Bruce, E., Boruff, B., Duncan, M.A., Horsley, J., Pauli, N., McNeill, K., Neef, A., Van Ogtrop, F., Curnow, J., Haworth, B., Duce, S., Imanari, Y. (2015) Development and the water–energy–food nexus: A perspective on livelihoods.

- Environmental Science & Policy Sustainable*. 54, 389–397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.002>
- Bijl, D. L., Bogaart, P. W., Dekker, S. C., Van Vuuren, D. P. (2018) Unpacking the Nexus: different spatial scales for water, food and energy. *Global Environmental Change*, 48, 22–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.005>
- CAF (2018) Resilient cities, key in the attention of natural disasters. Development Bank of Latin America. <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2018/06/ciudades-resilientes-clave-en-la-atencion-de-desastres-naturales/>
- Cansino-Loeza, B., Ponce-Ortega, J. M. (2018) Involving the water-energy-food nexus in integrating low-income and isolated communities. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 7, 1, 1399-1418. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05134>
- Cansino-Loeza, B., Sánchez-Zarco, X. G., Mora-Jacobo, E. G., Saggiante-Mauro, F. E., González-Bravo, R., Mahlknecht, J., Ponce-Ortega, J. M. (2020) A systematic approach for assessing the water-energy-food nexus for sustainable development in regions with resource scarcities. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c04333>
- Carmen-Valdez, M., Adler, I., Barrett, M., Ochoa, R., Pérez, A., (2016) The water-energy-carbon nexus: optimizing rainwater harvesting in México city. *Environmental Processes*. 3, 307-323. DOI: [10.1007/s40710-016-0138-2](https://doi.org/10.1007/s40710-016-0138-2)
- CFE (2018) Usuarios y consumo de electricidad por municipio 2018. Comisión Federal de Electricidad. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/usuarios-y-consumo-de-electricidad-por-municipio-a-partir-de-2018>.
- Craig-Coope, D. (2012) Sustainability and energy development: influences of greenhouse gas emission reduction options on water use in energy production. *Environmental Science Technologies*. 46, 3509–3518. DOI: <https://doi.org/10.1021/es201901p>
- CONAGUA (2018) Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), Atlas del agua en México (2018). CDMX, México. <https://agua.org.mx/biblioteca/atlas-de-agua-en-mexico/>

- CONAGUA and SDANL (2017) Programa Hidráulico del Estado de Nuevo León. Comisión Nacional del Agua y Secretaría de Desarrollo Agropecuario de Nuevo León. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf.
- CONEVAL (2018) Informe y evaluación de pobreza del Estado de Nuevo León. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. www.coneval.org.mx/Informes_de_pobreza_y_evaluacion_2018.
- Eakin, H., Magaña, V., Smith, J., Moreno, J. L. (2007), Stakeholder driven process to reduce vulnerability to climate change in Hermosillo, Sonora, Mexico. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(5), 935-955. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9107-4>
- EAM (2018) Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf.
- Eboli, F., Parrado, R., Roson, R. (2010) Climate-change feedback on economic growth: explorations with a dynamic general equilibrium model. *Environment and Development Economics*, 15(05), 515–533. <https://doi.org/10.1017/S1355770X10000252>
- Edgar, T. F., Himmelblau, D. M., Lasdon, L. S. (1988) Optimization of chemical processes. McGraw-Hill chemical engineering series. ISBN 0-07-039359-1.
- EESNL (2016) Secretaría de Salud Nuevo León 2016. http://www.saludnl.gob.mx/drupal/sites/default/files/estrategia_estatal.pdf.
- Energy Transitions Commission, 2018, Mission Possible. www.energy-transitions.org
- FAO (2012) World Agriculture Towards 2030/2050. Agricultural Development Economics Division. Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org/economic/esa.
- FAO (2010) Food definition. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/elearning/course/FC/es/pdf/trainerresources/learnernotes0531.pdf>

- FAO (2018) FAO: Hunger increases in the world and in Latin America and the Caribbean for the third consecutive year. Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org/americas/noticias.
- Fuentes-Cortés, L. F., Ponce-Ortega, J. M. (2017). Optimal design of energy and water supply systems for low-income communities involving multiple-objectives. *Energy Conversion and Management*, 151, 43–52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.050>
- Fulton, J., Cooley, H. (2015) The water footprint of California's energy system, 1990–2012. *Environmental Science Technologies*. 49, 3314–3321 DOI: <https://doi.org/10.1021/es505034x>
- GAMS. Solvers Manuals. General Algebraic Modeling System. https://www.gams.com/latest/docs/S_MAIN.html.
- Gasser, P. (2020) A Review on Energy Security Indices to Compare Country Performances. *Energy Policy*, 139, 111339. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111339>
- Giupponi, C., Gain, A. K. (2016) Integrated spatial assessment of the water, energy and food dimensions of the Sustainable Development Goals. *Regional Environmental Change*, 17 (7), 1881–1893. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0998-z>
- González-Bravo, R., Fuentes-Cortés, L. F., Ponce-Ortega, J. M. (2016) Defining priorities in the design of power and water distribution networks. *Energy*. 137 (2017) 1026-1040 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.079>
- González-Bravo, R., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M. (2016) Multiobjective optimization of dual-purpose power plants and water distribution networks. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 4, 6852–6866. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01817>
- González-Bravo, R., Saucedo-Valenzuela, M., Mahlknecht, J., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M. (2018) Optimization of water grid at macroscopic level analyzing water–energy–food nexus. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 6, 12140–12152. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02484>

- Harwood, S. A. (2018) In search of a (WEF) nexus approach. *Environmental Science Policy*, 83:79–85. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.020>
- Hernández-Pérez, L. G., Sánchez-Tuirán, E., Ojeda, K. A., El-Halwagi, M. M., Ponce-Ortega, J. M. (2019) Optimization of microalgae-to-biodiesel production process using a metaheuristic technique. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 7, 9, 8490-8498. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00274>
- Hoff, H. (2011), Understanding the Nexus. Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus, Stockholm Environment Institute, Estocolmo.
- Instituto para el Agua, Medio Ambiente y Salud de la Universidad de la ONU (UNU-INWEH), 2019. <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/unwdpc.shtml>
- INECC (2012) Ley General de Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130718.pdf.
- INEGI (2017) Sistema de consulta de información censal. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/>
- INEGI (2019) Climatología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- INEGI (2019). Metodología de indicadores de la serie censal. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. <https://www.inegi.org.mx/app/indices>.
- Karnib, A. (2018). Bridging science and policy in water-energy-food nexus: using the Q-nexus model for informing policy making. *Water Resources Management*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2059-5>
- Karnib A., Alameh A. (2020) Technology-oriented approach to quantitative assessment of water–energy–food nexus. *International Journal of Energy and Water Resources*. <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00061-w>
- Seager, T. P. (2008) Beyond eco-efficiency: a resilience perspective. *Business Strategy and the Environment*, 17(7), 411–419. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.632>

- Levenson, N., Dulac, N., Zipkin, D., Cutcher-Gershenfeld, J., Carroll, J., Barrett, B. (2006) Engineering resilience into safety-critical systems. *Resilience Engineering-Concepts and Precepts*. Ashgate Aldershot 95-123.
- Liang, Y., Li, Y., Liang, S., Feng, C., Xu, L., Qi, J., Yang, Z. (2020). Quantifying direct and indirect spatial food-energy-water (FEW) nexus in China. *Environmental Science & Technology*. 54, 16, 9791–9803, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06548>
- Liang, S., Qu, S., Zhao, Q., Zhang, X., Daigger, G., Newell, J., Xu, M. (2018) Quantifying the urban food–energy–water (FEW) nexus: the case of the Detroit metropolitan area. *Environmental Science & Technology*. 53, 2, 779–788. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06240>
- Magaña, V. (2016) Consideraciones para un programa de investigación de la sequía en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5): 115-133
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., Pérez, J. B. (2003) Impact of El Niño on precipitation in Mexico, *Geofísica Internacional*, 42, 3, 313-330.
- Mahlknecht, J., González-Bravo, R., Loge, F. J. (2019) Water–energy–food security: a nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean. *Energy*. 194, 116824., <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116824>
- Mannan, M., Al-Ansari, T., Mackey, H. R., Al-Ghamdi, S. G. (2018). Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 193, 300–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.050>
- Moradi-Aliabadi, M., Huang, Y. (2016) Multistage optimization for chemical process sustainability. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 4, 6133–6143. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01601>
- Morari, M. (1983) Flexibility and resiliency of process systems. *Computers and Chemical Engineering*. 7, 4, 423-437. DOI: [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(83\)80021-0](https://doi.org/10.1016/0098-1354(83)80021-0)

Mu, M., Zhang, Z., Cai, X., Tang, Q. (2020) Seasonal risk assessment of water-electricity nexus systems under water consumption policy constraint. *Environmental Science & Technology*. 423-4371983, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00171>

Naciones Unidas (UN), 2018. Agua. <https://www.un.org/es/events/waterdecade/#:~:text=Con%20el%20fin%20de%20acelerar,Agua%2C%20y%20termina%20esa%20misma>

Naciones Unidas (2012) Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 4. Volumen 1: Gestionar el agua en un contexto de incertidumbre y riesgo. WWAP

Naciones Unidas. IHP-VIII: Water Security. <https://en.unesco.org/themes/water-security/hydrology/IHP-VIII-water-security>.

Namany, S., Al-Ansari, T., Govindan, R. (2019) Optimisation of the energy, water, and food nexus for food security scenarios. *Computers and Chemical Engineering*. 129:106513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106513>

Nhamo, L., Mabhaudhi, T., Mpanzeli, S., Nhemachena, C., Senzanje, A., Naidoo, D., Modi, A. T. (2019) Sustainability indicators and indices for the water-energy-food nexus for performance assessment: WEF nexus in practice—South Africa case study. *Preprints*.

Núñez-López, J. M., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M. (2021) Involving resilience in optimizing the water-energy-food nexus at macroscopic level. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 259–273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.037>

Núñez-López, J. M.; Villicaña-García, E.; Cansino-Loeza, B.; Rubio-Castro, E.; Ponce-Ortega, J. M. Involving acceptability in the optimal design of total integrated residential complexes involving the water-energy-waste nexus. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2018, 6 (6), 7390–7402. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04854>

OCHA (2020). Organización de las Naciones Unidas, América Latina y el Caribe: segunda región más propensa a los desastres

- naturales. [https://www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/20191202-ocha-desastres_naturales2 .pdf](https://www.humanitarianresponse.info/sites/www.humanitarianresponse.info/files/documents/files/20191202-ocha-desastres_naturales2.pdf). Accessed Apr 2020
- Oke, T. R., (1973) City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment Pergamon Press*. 7, 8, 769-779. DOI: [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Organización Mundial de la Salud (OMS), 2018. Cambio ambiental mundial, calidad del aire y salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Perrone, D., Murphy, J., Hornberger, G. M. (2011) Gaining perspective on the water-energy nexus at the community scale. *Environmental Science and Technology*, 45(10), 4228–4234. <https://doi.org/10.1021/es103230n>
- Piontek, F., Kalkuhl, M., Kriegler, E., Schultes, A., Leimbach, M., Edenhofer, O., Bauer, N. (2018) Economic growth effects of alternative climate change impact channels in economic modeling. *Environmental and Resource Economics*. 73(4), 1357-1385. <https://doi.org/10.1007/s10640-018-00306-7>
- Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), 2019. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-contrala-sequia-pronacose-programas-de-medidas-preventivas-y-de-mitigacion-a-la-sequia-pmpms-para-ciudades>
- Pahl-Wostl, C. (2017) Governance of the water–energy–food security nexus: a multi-level coordination challenge. *Environmental Science Policy*. 356-367, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.017>
- Panel Intergubernamental de la ONU sobre Cambio Climático (IPCC), 2007. Tercer Informe de Evaluación. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-sp.pdf>
- Panel Intergubernamental de la ONU sobre Cambio Climático (IPCC), 2018. Quinto informe de evaluación IPCC. https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml

- Pérez-Uresti, S. I., Ponce-Ortega, J. M., Jiménez-Gutiérrez, A. (2018) A multi-objective optimization approach for sustainable water management for places with over-exploited water resources. *Computers and Chemical Engineering*. 0098-1354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.10.003>
- Programa Nacional Contra Contingencias Hidráulicas (PRONACCH), 2019. <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-de-prevencion-contr-contingencias-hidraulicas-pronacch>
- Ringler, C., Bhaduri A., Lawford, R. (2013) The Nexus across water, energy, land and food (WELF): potential for improved resource use efficiency? *Current Opinion Environmental Sustainability*, 5(6), 617–624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.002>
- Regaber Matholding Group (2017) Ensayos metodológicos de sistemas de riego. Valladolid. <https://www.matholding.com/lineas-de-negocio/riego-profesional/>
- Saladini, F., Betti, G., Ferragina, E., Bouraoui, F., Cupertino, S., Canitano, G., Gigliotti, M., Autino, A., Pulselli, F. M., Riccaboni, A., Bidoglio, G., Bastianoni, S. (2018) Linking the water-energy-food nexus and sustainable development indicators for the Mediterranean region. *Ecological Indicators*, 91, 689–697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.035>
- SADM (2017) Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey. <https://web.sadm.gob.mx/>
- SAGARPA (2013) Nuevo León: Agenda de Innovación Agroindustrial. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Corporación de Desarrollo Agropecuario. <http://www.fupro19.org.mx/wp-content/uploads/2014/05/Agenda-2013-Final.pdf>.
- Scanlon, B. R., Ruddell, B. L., Reed, P. M., Hook, R. I., Zheng, C., Tidwell, V. C., Siebert, S. (2017) The food-energy-water nexus: Transforming science for society. *Water Resources Research*. 53, 3550–3556, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.035>

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentos, Corporación para el Desarrollo Agropecuario, 2019. Nuevo León: Agenda de Innovación Agroindustrial. <<http://www.fupro19.org.mx/wp-content/uploads/2014/05/Agenda-2013-Final.pdf>>
- SENER (2018) Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional. Secretaría de Energía. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/331770/PRODESEN-2018-2032-definitiva.pdf>.
- SENER (2019) Sistema de Información Energética (SIE) 2019. Secretaría de Energía. <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions>.
- SEDAGRO (2019) Boletín de clima. Secretaría de Desarrollo Agropecuario. https://www.nl.gob.mx/sites/default/files/bolclim_31.pdf.
- SEMARNAT (2019) Precipitación media histórica por estado. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://dgeiawf.semarnat.gob.mx>.
- Semiat, R. (2018) Energy issues in desalination processes. *Environmental Science and Technology*. 42, 22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.035>
- SET-NL (2019) Nuevo León en cifras. Secretaría de Economía y Trabajo de Nuevo León. <http://datos.nl.gob.mx/>.
- Shi, J., Li, H., An, H., Guan, J., Ma, N. (2019) What induces the energy-water Nexus in China's supply chains? *Environmental Science Technology*. 54(1), 372– 379. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04277>
- SIAP (2018a) Cierre Ganadero 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_p.php.
- SIAP (2018b) Cierre Agrícola 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>.
- Tol, R. S. J. (2009) The economic effects of climate change. *Journal of Economics Perspective* 23(2):29–51. DOI: <https://doi.org/10.1257/jep.23.2.29>

- Weitz, N., Strambo, C., Kemp-Benedict, E., Nilsson, M. (2017) Closing the governance gaps in the water–energy–food Nexus: insights from integrative governance. *Global Environmental Change*, 45, 165–173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.06.006>
- Wicaksono, A., Jeong, G., Kang, D. (2017). Water, energy, and food nexus: review of global implementation and simulation model development. *Water Policy*, 19(3), 440–462. DOI: <https://doi.org/10.2166/wp.2017.214>
- World Economic Forum (WEF) (2019) La globalización 4.0 nos ayudará a enfrentar el cambio climático. <https://es.weforum.org/agenda/2019/01/la-globalizacion-4-0-nos-ayudara-a-enfrentar-el-cambio-climatico-aqui-le-mostramos-como/>
- World Energy Council for Sustainable Energy (2014) La red de líderes del sector energético que promueva el suministro y uso sostenible de la energía en beneficio de todos. www.worldenergy.org
- Yi, J., Guo, J., Ou, M., Pueppke, S. G., Ou, W., Tao, Y., Qi, J. (2020) Sustainability assessment of the water-energy-food nexus in Jiangsu Province, China. *Habitat International*, 95, 102094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.102094>
- Yuan, M. H., Lo, S. L. (2019). Developing indicators for the monitoring of the sustainability of food, energy, and water. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109565. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109565>
- Zhang, C., Chen, X., Li, Y., Ding, W., Fu, G. (2018) Water–energy–food nexus: concepts, questions and methodologies. *Journal of Cleaner Production* 195, 625–639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.194>
- Zhang, T., Tan, Q., Yu, X., Zhang, S. (2020). Synergy assessment and optimization for water-energy-food nexus: Modeling and application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109565>
- Zhang, X., Vesselinov, V. V. (2017) Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. *Advances in Water Resources*. 101, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.12.017>

APÉNDICE A. PUBLICACIONES

ACS Sustainable Chemistry & Engineering

This document is confidential and is proprietary to the American Chemical Society and its authors. Do not copy or disclose without written permission. If you have received this item in error, notify the sender and delete all copies.

**A Multi-Objective Optimization Approach to Meet Water,
Energy and Food Needs in an Arid Region Involving Security
Assessment**

Journal:	<i>ACS Sustainable Chemistry & Engineering</i>
Manuscript ID	Draft
Manuscript Type:	Article
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Sánchez-Zarco, Kate Geraldine; Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Chemical Engineering González-Bravo, Ramón; Tecnológico de Monterrey Ponce-Ortega, José; Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Chemical Engineering

SCHOLARONE[™]
Manuscripts

ACS Paragon Plus Environment



Water, energy, and food security assessment in regions with semiarid climates

Katé Geraldine Sánchez-Zarco¹ · Edgar Geovanni Mora-Jacobo¹ · Ramón González-Bravo² · Jurgen Mahlkecht² · José María Ponce-Ortega¹

Received: 20 May 2020 / Accepted: 10 October 2020
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2020

Abstract

The availability, accessibility, and sustainability of resources can enhance or jeopardize the security of meeting human needs for water, energy, and food in several regions of the world. For this reason, it is crucial to propose strategies that allow quantifying the current situation of resource security and preventing alarming scenarios in the future. The objective of this paper is to assess the current condition of food, energy, and water security of a region with rampant economic development, but struggling with natural resources as a result of its adverse climatic conditions. An approach for assessing the water–energy–food security in arid or semiarid areas is presented through different scenarios considering the availability, accessibility, and sustainability of the involved resources. The proposed approach is applied in the State of Nuevo León in Mexico, which is the second-most important state regarding contribution to the national Gross Domestic Product. Nevertheless, the rapid increase in its population and the semiarid climate condition with precedents of natural catastrophes jeopardize the continuity of its development. Results show that the state may not be able to meet the demands of water and food due to the stress generated on its resources. In contrast, the energy situation is more promising with the implementation of energy from renewable sources. The analysis is carried out over a past time period and making projections until 2030, providing a tool to be able to make decisions in the medium and long term. The main goal is to propose preventive measures and to ensure sustainable planning covering economic, social, and environmental needs without compromising the well-being of future generations. In this sense, the implementation of new policies for the water sector is analyzed, with the aim of reducing domestic and agricultural consumption, targeting improvements in the evaluated indices.

✉ José María Ponce-Ortega
jponce@umich.mx

¹ Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mujica S/N, Ciudad Universitaria, 58060 Morelia, Michoacán, México

² Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada Sur No. 2501, 64849 Monterrey, Nuevo León, México

1 Systematic Approach for Assessing the Water–Energy–Food Nexus 2 for Sustainable Development in Regions with Resource Scarcities

3 Brenda Cansino-Loeza, Xate Geraldine Sánchez-Zarco, Edgar Geovanni Mora-Jacobo,
4 Frida Elizabeth Saggiante-Mauro, Ramón González-Bravo, Jürgen Mahlknecht,
5 and José María Ponce-Ortega*



Cite This: <https://dx.doi.org/10.1021/acsuschemeng.0c04333>



Read Online

ACCESS |

Metrics & More

Article Recommendations

6 **ABSTRACT:** Currently, the security of basic resources such as water,
7 energy, and food is regarded as essential for sustainable development.
8 Nonetheless, population growth, economic development, and
9 changing consumption patterns have caused stress on these resources.
10 It is expected that, in the near future, in many parts of the world, it
11 will be challenging to satisfy the demand of the population and the
12 access to essential services. Assessing the availability and access to
13 natural resources allows for making projections of future scenarios
14 and, in this sense, developing policies to mitigate deficiencies in all
15 these sectors. This work presents an approach to assess the progress
16 on the water–energy–food nexus security through an index that
17 involves availability, accessibility, and sustainability indicators of a
18 region over a time period. The evaluation considering the Sustainable
19 Development Goals allows for identifying vulnerabilities associated with the water–energy–food nexus. The state of Sonora in
20 Mexico was selected as a case study because of its unequal distribution and accessibility of resources. Results show that water, energy,
21 and food access is not at risk, but the importation of resources to meet the demand of the state makes the nexus unsustainable
22 because the availability of resources is not enough to satisfy the services of the population. Nevertheless, projections for 2030 show
23 slight improvements in the water–energy–food nexus security.

24 **KEYWORDS:** Energy security, Food security, Water security, Resource depletion, Sustainability indicators, Sustainable Development Goals



25 ■ INTRODUCTION

26 The water–energy–food (WEF) nexus has become a focus of
27 study for the decision-making analysis toward sustainable
28 development. The nexus thinking was first introduced in the
29 Bonn Conference,¹ where special attention was given to the
30 sustainable integration and management of water, energy, and
31 food, including their interlinkages. It was not until the Bonn
32 Conference that the WEF nexus gained global attention, as
33 well as the interest in recognizing the consequences of external
34 impacts in the three sectors simultaneously. Rapid urban-
35 ization, exponential population growth, and changing diets
36 have been the main drivers of the alteration in demand
37 patterns that have considerably increased in the last few
38 decades.² Nonetheless, climate change is an essential fact that
39 must be considered in the decision-making process because it
40 is possible that resource security will never be achieved entirely
41 with the increasing demands.³ By 2050, an increase in water
42 demand of 55% is estimated.⁴ Furthermore, it is expected that
43 almost 57% of the global population will suffer water scarcity,⁵
44 energy consumption will augment up to 50%,⁶ and the food
45 demand will increase up to 60%.⁷ Therefore, the assessment of

the WEF nexus is crucial because the interaction between these
46 sectors makes it more challenging to face the increasing
47 demands, and consequently, this could lead to further resource
48 scarcity.

49 Water, energy, and food are inextricably interrelated, and
50 they are essential for the subsistence of human beings.⁸ Water
51 is necessary for fossil fuels, electricity production, and
52 agriculture. Energy is required for water treatment and its
53 distribution and for food storage and production; on the
54 contrary, food production can contribute to fuel stocks.⁹ Any
55 change in the availability of these resources has strong effects
56 on human health and quality of life (Figure 1). The nexus
57 thinking is an integral tool for the understanding of water, 58

Received: June 11, 2020

Revised: August 17, 2020

Published: August 20, 2020

1 MINLP Approach for Mosquito-Borne Disease Control through 2 Optimal Fumigation Policies

3 Fabricio Nápoles-Rivera,⁴ Xaté Geraldine Sánchez-Zarco, Lizeth Valencia-Barragán,
4 and José María Ponce Ortega⁵

5 Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida Francisco J. Mújica, SN, Building
6 VI, Ciudad Universitaria, 58060 Morelia, Michoacán, México

7 **ABSTRACT:** This work presents a mathematical model for the
8 strategic planning of the diseases caused by mosquitoes in a given
9 geographic location. The proposed model incorporates the modeling
10 of the transmission diseases by mosquitoes, and to control this
11 problem, there is proposed the incorporation of a dosing chemical to
12 kill the mosquitoes considering the best period and location for this
13 process, as well as incorporating the optimal selection of the used
14 chemical. The main idea is to control the associated problem at the
15 minimum cost. A case study from the central west part of Mexico is
16 presented, where this problem represents several infected people every
17 year. The results show that it is possible to mitigate the diseases in a
18 given region with low investment through the proper fumigation
19 planning and scheduling. The proposed model is general, and this can
20 be applied to different locations with the proper data.

21 **KEYWORDS:** Strategic planning, Mosquito-borne disease, Fumigation policies, Mathematical modeling



22 ■ INTRODUCTION

23 One of the major sources of disease in humans are borne vectors,
24 due to their ability to carry and spread arboviral diseases.¹ Some
25 of these diseases are malaria, dengue, chikungunya, zika, West
26 Nile virus, Japanese encephalitis, Lyme disease, and schistosom-
27 iasis, among others, that can be transmitted to humans by the
28 bite of an infected hematophagous arthropod, such as
29 mosquitoes, ticks, flies, or lice.

30 Specifically, mosquito-borne diseases (MBDs) affect low-
31 income populations in the tropics and subtropics,² affecting
32 millions of people around the world.³ For example, dengue fever
33 occurs in more than 125 countries with estimations between 50
34 and 100 million symptomatic infections every year.^{4,5} Due to its
35 importance in public health, several works have focused on
36 studying different aspects of MBD. Some of these works aim to
37 generate transmission blocking vaccines of mosquito-borne viral
38 diseases,⁶ analyzing different strategies for MBD control⁷ and
39 estimation and prediction of the effect of climatic conditions on
40 mosquitos' population and MBD outbreaks, such as the work by
41 Servadio et al.⁸ that presented an analysis of climate patterns and
42 MBD outbreaks in South and Southeast Asia identifying
43 temperature and precipitation peaks as potential conditions
44 for an outbreak. Also, Valdez et al.⁹ studied the effect of rainfall
45 on the Culex mosquito population, which is the main vector for
46 Japanese encephalitis, lymphatic filariasis, and West Nile fever.
47 Halbach et al.¹ presented a review of mosquito-specific and
48 mosquito-borne viruses evolution, infection, and host defenses.

49 Other authors have studied specific MBDs such as dengue. In
50 this sense, Bhatt et al.¹⁰ presented an overview of the dengue

51 distribution around the world; Messina et al.⁵ reviewed the
52 models for predicting the global distribution of Dengue, which is
53 a serious problem considering that the *Aedes aegypti* (*A. Aegypti*;
54 the primary dengue, chikungunya, and zika vector) is found in
55 peri domestic urban areas and that it is projected that by 2030
56 about 5 billion people will live urban areas and nearly half of the
57 population will reside in urban parts of the tropic. Magalhães et al.
58 studied the mosquito-borne and sexual transmission of the
59 zika virus. Alys-Zakrzak et al.¹¹ implemented an analysis of the
60 cost of chikungunya in Colombia. Kakarla et al.¹¹ formulated a
61 mathematical temperature-dependent model to predict the risk
62 of infection of chikungunya, finding that the available data
63 indicate correlation between the climatic conditions and the
64 probability of infection.

65 As can be seen, several efforts have been made to assess,
66 predict, and estimate different aspects of MBDs, toward the
67 generation of public health policies that can help to reduce the
68 burden of MBDs. One such policy is the prevention and control
69 of MBDs, which have become of paramount interest of public
70 health agencies around the world. An effective way to reduce
71 MBD infection is by reducing the mosquitoes' population. In
72 this sense, the main strategies are¹² synthetic or microbial
73 pesticides, insecticide-treated bed nets, repellents, biological
74 control agents, sterile insect technique, and boosted sterile
75 insect technique. The number of methods varies widely, and

Received: March 11, 2019

Revised: June 17, 2019

Published: July 7, 2019



A Multi-Objective Optimization Approach for Water–Energy–Food Grids in Isolated Communities

Xaté Geraldine Sánchez-Zarco¹ · Brenda Cansino-Loeza¹ · José María Ponce-Ortega¹ Received: 6 February 2019 / Revised: 17 May 2019 / Accepted: 21 May 2019
© Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019

Abstract

This paper evaluates the applicability of different multi-objective optimization methods such as goal programming, weighted sum, and epsilon constraint in a polygeneration system. The problem under study aims to meet the water, energy, and food demands in an isolated community. The model includes three fundamental objectives, which are the maximization of the economic benefit, the minimization of the greenhouse gas emissions, and the minimization of freshwater consumption. Because the objectives are in conflict, it is necessary to implement strategies that allow to obtain trade-off solutions. To show the applicability of the proposed approach, a case study for the community of Mexico with the lowest human development index is presented. The results show feasible solutions for satisfying the needs of the community considering the trade-offs of the different objectives, with the goal programming method the one that provides the most attractive solution except for the economic objective, unlike the Epsilon Constraint method that provides the best solutions with respect to the economic objective.

Keywords Optimization · Process integration · Isolated communities · Simulation · Multi-objective problems

Introduction

Rapid urbanization as well as the need to supply water, energy, and food represent severe problems for the development of communities towards a sustainable route (Scanlon et al. 2017) (see Fig. 1). Energy is necessary for the extraction, treatment, and distribution of water, and for its production, water is also required. In the same way, water and energy are necessary for agriculture to provide food. It is expected that the demands of each of these resources will increase by 50% during the next two decades and, consequently, it is a priority to integrate these resources in a sustainable manner.

It has been considered that the generation and distribution of energy can contribute to poverty reduction (Colombo et al. 2013). In addition, the relationship between energy and water can synthesize the connections between generation and consumption of a city for further development (Chun and Chen 2016). Towards a less carbon-dependent and sustainable

future, the use of clean sources plays a very important role (Zhang et al. 2018). An important strategy for sustainability issues is the use of polygeneration systems for improving economic, environmental, and social aspects (Bamufleh et al. 2013). The use of cogeneration systems has been proposed to meet the energy demands considering the selection of combined heat and power technologies (Fuentes-Cortes et al. 2015a, 2015b). Moreover, cogeneration systems can be implemented in communities that do not have a favorable geographic location where satisfying basic services is not possible due to the low access to water, energy, and food (Fuentes-Cortes et al. 2019).

Water, energy, and food are related to each other, and each of them is dependent on the other (Bazilian et al. 2011). The water–energy–food nexus allows sustainable development and equity in local and global development in inhabitants, identifying potential links with a new concept of environmental livelihood security (Biggs et al. 2015); similarly, it represents a stress over natural resources by different factors (García and You 2017) when trying to improve each sector with planning and decision-making (Hoff 2011). Multiple strategies have involved different types of technologies with the objective of reducing operating costs, social and health impact, and carbon dioxide emissions to the environment (Blököp and Turkenburg 1994). In this context, the

✉ José María Ponce-Ortega
jmponce@umich.mx

¹ Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mujica S/N, Ciudad Universitaria, 58060 Morelia, Michoacán, Mexico