

## EFFECTO DE LA OPTIMIZACION EN LA DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN HUATUSCO, VER., MEDIANTE LA DINAMICA DE SISTEMAS

### EFFECT OF OPTIMIZATION ON WATER AVAILABILITY IN HUATUSCO, VER., THROUGH SYSTEMS DYNAMICS

Fernando Hernández Benito <sup>1</sup>, Martín González Sobal <sup>2</sup>, Luis Antonio Calderón Palomares <sup>3</sup>, Miguel Ángel Solís Jiménez <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Industrial, Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, Maestría en Ingeniería, [ferhebe07@gmail.com](mailto:ferhebe07@gmail.com), 273734400, Av. 25 poniente #100 Colonia Reserva Territorial; <sup>2</sup> Maestro en Ingeniería, Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, División Ingeniería Industrial, [mgonzalezs@huatusco.tecnm.mx](mailto:mgonzalezs@huatusco.tecnm.mx), 273734400, Av. 25 poniente #100 Colonia Reserva Territorial; <sup>3</sup> Doctor en Logística y Dirección de la Cadena de Suministros, Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, División Ingeniería Industrial, [lcalderonp@huatusco.tecnm.mx](mailto:lcalderonp@huatusco.tecnm.mx), 273734400, Av. 25 poniente #100 Colonia Reserva Territorial; <sup>4</sup> Maestro en Ingeniería, Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, División Ingeniería Industrial, [msolisj@huatusco.tecnm.mx](mailto:msolisj@huatusco.tecnm.mx), 273734400, Av. 25 poniente #100 Colonia Reserva Territorial.

**Resumen** – La presente investigación analiza el estado actual de la distribución de agua en el municipio de Huatusco, Ver; mediante la dinámica de sistemas con el objetivo de verificar, si en un plazo de 12 años se tendrá disponibilidad del vital líquido en la zona urbana.

Para su desarrollo, la investigación se basa en las etapas metodológicas de la dinámica de sistemas, dentro de las cuales se realiza un diagnóstico de la distribución del agua, lo que permite identificar las variables de estudio y mediante la aplicación del software Stella generar un modelo de simulación que amplíe el panorama a partir de corridas que permitan generar nuevas estrategias que ayuden a optimizar la distribución del recurso hídrico, una vez implementado se procede a documentar dicho proceso, a la par se realiza la concientización continua a los usuarios, mediante conferencias y actividades en conjunto con la comisión municipal del agua para coadyuvar en mantener la disponibilidad de agua dentro del municipio en estudio.

Al aplicar dicha metodología se identifican una serie de estrategias que contribuyen en el aumento de la disponibilidad del agua dentro del municipio de Huatusco, Ver; logrando pasar de un déficit de agua (-32,387.78 m<sup>3</sup>) para el año 2034 a generar un superávit del recurso (115,937.4 m<sup>3</sup>) en un plazo de 12 años, siempre y cuando se mantenga la implementación de dichas estrategias.

**Palabras Clave:** Agua, Disponibilidad de agua, Dinámica de sistemas, Optimización, Escasez de agua.

**Abstract** -- The present investigation analyzes the current state of water distribution in the municipality of Huatusco, Ver; through system dynamics with the objective of verifying if, in a period of 12 years, the vital liquid will be available in the urban area.

For its development, the research is based on the methodological stages of system dynamics, within which a diagnosis of the distribution of water is made, which allows the study variables to be identified and, through the application of the Stella software, to generate a model simulation that broadens the panorama from runs that allow the generation of new strategies that help optimize the distribution of water resources, once implemented, this process is documented, at the same time continuous awareness is carried out for users, through conferences and activities in conjunction with the municipal water commission to help maintain the availability of water within the municipality under study.

By applying this methodology, a series of strategies are identified that contribute to increasing the availability of water within the municipality of Huatusco, Ver; managing to go from a water deficit (-32,387.78 m<sup>3</sup>) by the year 2034 to generating a surplus of the resource (115,937.4 m<sup>3</sup>) within a period of 12 years, as long as the implementation of said strategies.

**Key words** – Water, Water availability, System dynamics, Optimization, Water scarcity.

#### INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales han sido ampliamente discutidos y analizados, tan a nivel global como al interior de algunas naciones, desde muchas perspectivas como la económica, política, educación, sociología y la misma ecología [1].

Esta investigación analiza y evalúa un nuevo enfoque de sistemas adaptativos complejos para modelar las interacciones dinámicas entre el crecimiento de la población, el uso del agua, la red de distribución y la transferencia entre fuentes de abastecimiento del vital líquido a partir del entorno.

Se analiza un ciclo hidrológico tradicional, en donde la oferta del agua se coloca como un recurso inagotable para la sociedad; y así mismo, se analizan las estrategias ante diversas situaciones que en la actualidad están interviniendo dentro de este ciclo, como lo es el incremento de la población.

El municipio de Huatusco de Chicuellar, Veracruz, será nuestro modelo base de estudio, este se encuentra en la zona de las altas montañas, dada su ubicación, esta zona es basta en recursos naturales, podemos afirmar que actualmente no carece desabasto de agua, como en otros municipios colindantes que están a 2 horas de distancia, lo cual es una referencia preocupante.

Dentro de la región de estudio la gestión del agua se basa en una mera normativa interna del órgano municipal responsable del manejo del agua en la ciudad, no se cuenta con un modelo que oriente la óptima gestión del agua. Aunado a esto, el crecimiento poblacional es mayor cada año extendiendo la mancha urbana del municipio, por lo que es imperativo formular un nuevo modelo que oriente de manera efectiva la manera en que se dará solución a los nuevos requerimientos hídricos de la zona, considerando los retos actuales.

En cuanto a disposición de agua, esta depende básicamente de los escurrimientos naturales que alimentan un manantial del cual se suministra a la ciudad, sin embargo y de acuerdo con las estadísticas que tenemos, sabemos que en promedio se tiene un nivel de precipitación anual que ronda entre los 1,100 y 1600mm de lluvia, además de que esta se presenta la mayor parte del año [2].

Es por ello, que a partir de esta investigación se busca analizar el estado actual de la distribución de agua en el municipio de Huatusco, y mediante la dinámica de sistemas verificar su disponibilidad en un plazo de 12 años.

## DESARROLLO

### Revisión de Literatura

El término “sistema” posee varias acepciones en su uso ordinario [3]; para nosotros el termino sistema es un instrumento generado por diversos conjuntos entre los que se contemplan algunas formas de relación entre sí mismas.

El enfoque sistémico es una manera de abordar y formular problemas con vistas a una mayor eficacia en la acción, que se caracteriza por concebir a todo objeto como un sistema o componente de un sistema [4], como lo observamos en el siguiente diagrama, en donde un sistema incorpora entradas para posteriormente mantener salidas.

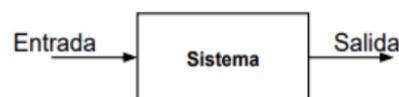


Figura 1: Elementos de un sistema.

### Metodología de la Dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas, ubicada en el área de conocimiento similar a la teoría general de los sistemas, la cibernética y la automática, nace en la 21v aplicación desarrollada por Jay W. Forrester en los años 50 sobre la teoría de los bucles de realimentación en una problemática de gestión industrial [5].

El saber de la complejidad "analiza a fenómenos que surgen de una compilación de conjuntos que interactúan entre sí" [6].

Los sistemas complejos muestran las cualidades que hacen la diferencia entre los demás sistemas, por confusos que sean. Estas propiedades hacen que los sistemas generen comportamientos emergentes entre sus elementos. Tal es el aspecto de los sistemas del agua, puesto que se ha llamado a la reutilización del agua a partir de una característica emergente [7].

El objetivo de los sistemas y la simulación enfocada a la gestión del agua es un punto importante de investigación y evolución técnica más sobresaliente de la ciencia [8].

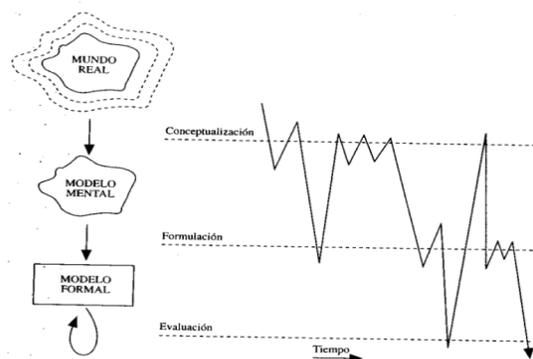


Figura 2: Fases de desarrollo de un modelo.

### Fase de la conceptualización del modelo

Consiste en la adopción de una perspectiva y en el esbozo de una comprensión de un cierto fenómeno del mundo real [3].

Una vez que se conoce la situación a investigar, se define con exactitud los puntos a resolver de la problemática y se describen de manera más precisa y específica. En esta fase se debe ser muy minucioso y preciso

### Fase de la formulación del modelo causal

Una vez construido el diagrama causal se empieza a desarrollar espacio físico con ayuda de lenguaje matemático. Dentro de la dinámica de sistemas primeramente se establece un diagrama de Forrester con lo cual se van describiendo las indicaciones matemáticas del modelo; y su vez estas fórmulas permitan su interpretación informática.

Para dar a conocer un sistema, el método de la dinámica sistémica plantea el uso de diagramas como el de causa-efecto y el diagrama de flujo. Los organigramas causales se manejan para generar nuevas hipótesis dinámicas a través de observar la relación entre los parámetros que engloban a la problemática. Los organigramas de flujo y

también los de nivel nos muestran una perspectiva de las interrelaciones que existen entre las variables de cada una de las etapas [9].



Figura 3: Ejemplo diagrama causal

### Fase del modelo dinámico

Consiste en evaluar el modelo generado, así también su consentimiento a diversos criterios de aceptabilidad.

Una vez que se obtienen los resultados, se procede a dar un veredicto respecto al cumplimiento de las hipótesis planteadas y posteriormente se analiza el modelo respecto a los diferentes escenarios, con la finalidad de generar recomendaciones para unas futuras mejoras [3].

Ante un determinado comportamiento problemático, el sistemista pretende determinar cómo éste emerge. Para resolver ese problema debe desarrollar una descripción cuya estructura permita generar ese comportamiento.

Una vez aplicadas las estrategias requeridas ante la problemática para su factible solución, se debe volver a simular, para generar nuevas perspectivas de la situación analizada.

### Fase de validación del modelo dinámico.

Una vez que el modelo de simulación se ha generado, se deberá repetir la simulación desarrollando las estrategias que permitan una adecuada visión a la decisión a tomar para que la problemática sea resuelta.

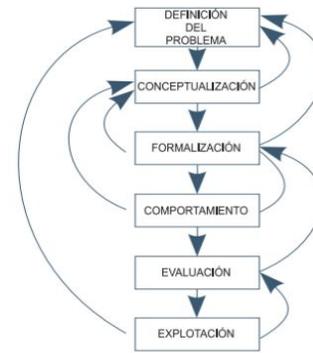


Figura 4: Flujo de las fases de la dinámica de sistemas.

### Software de Simulación

Para el desarrollo de la simulación de cualquier modelo, es necesario mantener herramientas tecnológicas e informáticas para poder analizar estos modelos. En este estudio se aplican las características del software de simulación denominado Stella.

### Aplicación de la Metodología

El presente trabajo se realiza mediante la aplicación de la metodología de la dinámica de sistemas dentro del municipio de Huatusco de Chicuellar, Veracruz; dentro del área del CMAS (Comisión Municipal de Agua Potable y Saneamiento) como principal organizadora y distribidora del vital líquido para los huatusqueños. En los inicios de proyecto se definió un plan para proceder a dar solución a la problemática identificada.

### Identificación y Análisis de la Problemática

El municipio de Huatusco de Chicuellar, se encuentra ubicado en la zona centro de las altas montañas del estado de Veracruz; en donde alberga una población total de 59,960 habitantes, las cuales 47.7% son hombres y el 52.3% son mujeres. Manteniendo una densidad de población de 295.3 hab/Km<sup>2</sup> de acuerdo con datos recabados del INEGI.

Del año 2013 al 2021, existen alrededor de 10,376 tomas de agua potable; de las cuales, todas están dadas de alta ante la comisión del agua municipal. Estas tomas de agua son las que se conectan a la red de distribución de la ciudad para poder abastecer del recurso a cada uno de los usuarios activos con pagos al corriente.

Tabla 1: Historial de consumo de agua en Huatusco.

Año	Consumo (m <sup>3</sup> )
2017	1, 831, 505
2018	1, 826, 202
2019	2, 468, 492
2020	2, 658, 785
2021	2, 715, 598

Como podemos observar en la tabla 1, se analiza la cantidad de agua necesaria en cada uno de los años anteriores, es decir que se necesita suficiente agua para poder satisfacer la demanda de toda la ciudadanía y de sus actividades cotidianas en la actualidad.

Es por ello por lo que, el municipio cuenta con tres caudales que ayudan a cumplir con dicha solicitud de agua en la cabecera municipal, los cuales se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Fuentes de abastecimientos de agua de Huatusco.

Fuente	Volumen Extraído (m <sup>3</sup> /año)	Ubicación
Manantial Axol	1, 419, 200	Latitud: 19°07'43" Longitud: 96°59'12"
Manantial Naranja Agrio	207, 360	Longitud: 19°10'22" Latitud: 96°57'56"
Manantial Coxolo	342, 480	Longitud: 19°10'55" Latitud: 96°59'50"

Como podemos observar en la tabla 2, el municipio es basto en recurso hídrico en la actualidad, por lo cual no habría complejidad en utilizar este medio de vida para diversas actividades sin necesidad de cuidar el consumo; y es por ello por lo que hoy en día, la comisión designa como un servicio promedio la cantidad de 20 m<sup>3</sup> por familia al mes.

Tabla 3: Costo de agua en Huatusco.

Tipo de Tarifa	Domestica	Comercial	Industrial
\$ Promedio	\$ 48.755	\$ 69.545	\$ 228.53

Aunado a ello, dentro de la ciudad de Huatusco, se llegan a generar 55 toneladas de residuos sólidos acumulados, los cuales hacen que algunos habitantes obtén por quemar dichos residuos, tal es el caso de la Colonia El Cuatro; además de que en puntos como el de la Colonia Reserva y en el lugar conocido coloquialmente como El Zanjón, se lleva a cabo la acumulación de residuos sólidos, generando espacios de alta contaminación para el municipio.



Figura 5: Acumulación de residuos sólidos.

Una vez realizado este análisis, nos corresponde responder las siguientes preguntas: En verdad, ¿tendremos agua potable y limpia dentro de 30 años?, ¿seguiremos disfrutando de este vital líquido?, ¿Dejaremos a nuestros sucesores parte de este gran recurso que la naturaleza nos brinda hoy?

### Fase 2: Modelo o diagrama causal

Como resultado obtenido en nuestro análisis actual se logran rescatar las variables que darán paso a nuestro diagrama causal, las cuales se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Variables del modelo de simulación.

VARIABLE	CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	FUENTE
Población	59920	Habitantes	Número de habitantes actualmente en Huatusco.	Inegi (2020)
Tasa de natalidad	1.2	%	Índice de nacimientos en Huatusco	Inegi (2020)
Tasa de mortalidad	0.75	%	Índice de población que nace en la Ciudad.	Inegi (2020)
Brecha de cobertura	5	Habitantes	Promedio de personas por familia.	INEGI 2020
Volumen extraído Naranja	207360	m <sup>3</sup> /año	Cantidad de líquido extraído de la Fuente	CMAS Huatusco
% explotación N	5	%	Porcentaje de explotación de agua en la fuente.	Investigación de campo.
Volumen extraído Axol	1419200	m <sup>3</sup> /año	Cantidad de líquido extraído de la Fuente	CMAS Huatusco

<b>% explotación A</b>	3	%	Porcentaje de explotación de agua en la fuente.	Investigación de campo.
<b>Volumen extraído Coxolo</b>	342480	m <sup>3</sup> /año	Cantidad de líquido extraído de la Fuente	CMAS Huatusco
<b>% explotación C</b>	5	%	Porcentaje de explotación de agua en la fuente.	Investigación de campo.
<b>Uso de agua domestico</b>	217146	m <sup>3</sup>	Capacidad total utilizada de tipo Domestico	Investigación estadística.
<b>Cantidad de Domiclios</b>	9755	Usuarios	Cantidad de tomas de agua de tipo doméstico registradas.	CMAS Huatusco
<b>Coefficiente consumo domestico</b>	21.20	m <sup>3</sup>	Cantidad de agua promedio para uso doméstico.	Investigación estadística.
<b>Costo de agua tipo domestico</b>	48.76	\$	Costo monetario por cada metro cubico.	CMAS Huatusco
<b>Cantidad de comercios</b>	588	Usuarios	Cantidad de tomas de agua de tipo Comercial registradas.	CMAS Huatusco
<b>Coefficiente consumo comercial</b>	26.8	m <sup>3</sup>	Cantidad de agua promedio para uso comercial.	Investigación estadística.
<b>Costo de agua tipo comercial</b>	69.55	\$	Costo monetario por cada metro cubico.	CMAS Huatusco
<b>Cantidad de Industrias</b>	33	Usuarios	Cantidad de tomas de agua de tipo industrial registradas.	CMAS Huatusco
<b>Coefficiente consumo industria</b>	44.8	m <sup>3</sup>	Cantidad de agua promedio para uso industrial.	Investigación estadística.
<b>Costo de agua tipo industrial</b>	228.53	\$	Costo monetario por cada metro cubico.	CMAS Huatusco

<b>Mantenimiento</b>	3000	\$	Costo promedio del mantenimiento a fugas.	CMAS Huatusco
<b>Fugas</b>	150	Fugas	Cantidad de fugas promedio.	CMAS Huatusco
<b>Capacidad de Bombeo</b>	8 / 12	m <sup>3</sup> /s	Cantidad de agua dentro de la red de saneamiento.	CMAS Huatusco
<b>Contaminación</b>	150 - 200	m <sup>3</sup>	Cantidad de agua contaminada anualmente.	Investigación estadística.

Una vez que conocemos las relaciones causales entre nuestras variables, se logra llegar al desarrollo de nuestro diagrama causal de manera general, para poder así tener una perspectiva completa de cómo solucionar nuestra problemática principal.

Nuestro diagrama causal considera aspectos como el cambio climático, el crecimiento de la población, el estatus de las fuentes de abastecimiento, la demanda de agua que genera el municipio de acuerdo con la oferta brindada por las fuentes y las tomas de agua con las que cuenta el municipio. Además, podremos analizar en el diagrama que se presenta a continuación, los diferentes tipos de toma que la comisión del agua regula para su funcionamiento idóneo.

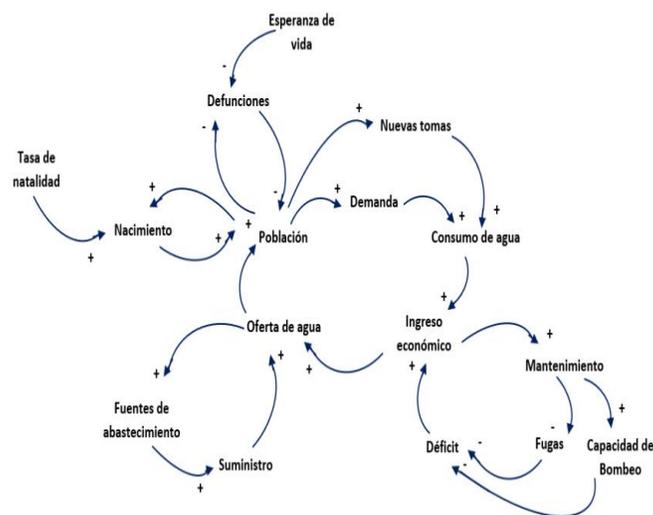


Figura 6: Modelo causal de la distribución del agua en Huatusco.

De esta manera, el agua se distribuye a través de la población huatusqueña, considerando diversos factores día con día, en donde no sabemos nuevamente si el agua permanecerá entre nosotros y será suficiente para nuestras futuras generaciones.

### Fase 3: Análisis del modelo dinámico

Para lograr descubrir el modelo dinámico, se generaron ecuaciones que ayudaran a alimentar nuestro diagrama cuantitativo de acuerdo con las variables ya consideradas, las cuales se presentan a continuación, considerando su naturaleza dinámica:

$$Q = \sum_{i=1}^n F - \sum_{i=1}^n D + \sum_{i=1}^n R - \sum_{i=1}^n P \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

Q= Cantidad total del agua (en exceso o déficit).

F= Las fuentes de abastecimiento que prevé la ciudad.

D= La demanda del agua (de tipo doméstica, comercial e industrial).

R= El agua total recuperado o tratado para su reutilización.

P= Perdidas dentro del sistema, usualmente por fugas y tomas clandestinas.

El modelo dinámico del sistema considerará ciclos de retroalimentación correspondientes y diversas variables de acuerdo con cada uno de los procesos que intervienen en la ecuación general de esta problemática. Es por ello, que en un modelo general del ciclo hidrosocial se deben administrar las siguientes operaciones de la Oferta – Demanda del sistema.

$$\sum_{i=1}^n F = \text{Caudal Axol} + \text{Caudal Naranjo} + \text{Caudal Coxolo} \quad \text{Ec. (2)}$$

En donde, la sumatoria total de las fuentes de abastecimiento se verá intervenida por el agua recolectada del caudal Axol, el caudal Naranjo y de la fuente Coxolo; a partir de la precipitación pluvial de la zona.

Dentro de la demanda existen mayor número de factores que intervienen, los cuales se presentan a continuación:

$$\sum_{i=1}^n D = \text{Domestico} + \text{Comercial} + \text{Industrial} \quad \text{Ec. (3)}$$

En donde, la demanda estará conformada por los diversos tipos de consumo del agua, como lo es el doméstico, el consumo comercial y el industrial; dependiendo de la cantidad que exista de cada uno de estos factores.

La cantidad total se refleja cuando el agua discurre por las fuentes abastecedoras y la oferta neta, es el agua que ofrecen las fuentes para lograr prevalecer el caudal [10].

Dentro de la demanda, existe una serie de factores que necesitan de otros para llevarse a cabo, como lo son:

$$\text{Nuevas tomas} = \text{Usuario} + (\text{Brecha de cobertura} * \text{Factor de aumento}) \quad \text{Ec. (4)}$$

En donde:

Usuarios: La cantidad actual de tomas de agua dadas de alta ante el sistema.

Brecha de cobertura: Población pronosticada para el año de estudio.

Factor de aumento: Porcentaje de incremento en las tomas de agua por año.

Estas variables se encuentran interrelacionadas formando bucles de realimentación en una unidad estructural de la red de abastecimiento de agua para la ciudad de Huatusco, Ver; lo que determina su característica sistémica.

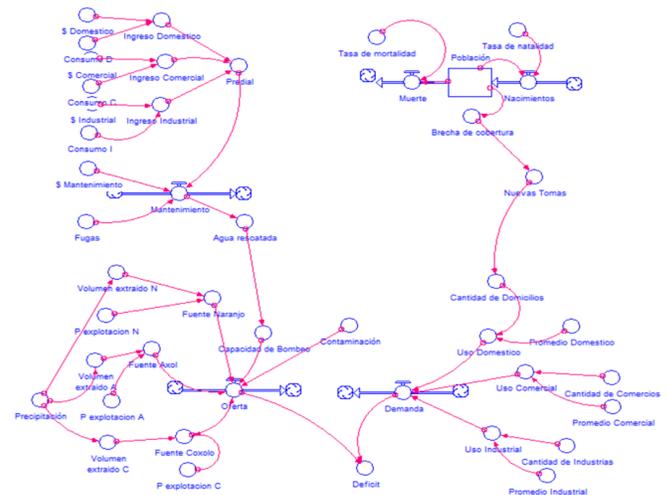


Figura 7: Modelo de simulación Stella-Huatusco.

El modelo, permite hacer simulaciones de diferentes escenarios y pronosticar los resultados en el futuro. Además, se analiza el crecimiento en el tiempo de dos variables de gran importancia; la población y el suministro del agua de manera anual.



Figura 8: Resultado simulación Stella.

#### Fase 4: Verificación del modelo de simulación

Una vez que el modelo se ha desarrollado y simulado a través del tiempo; para lo cual se prevé su análisis de manera anual para satisfacer la organización de la organización municipal, se logran generar diez

simulaciones consecutivas, con la finalidad de validar estos resultados y así poder verificar la tendencia de la investigación.

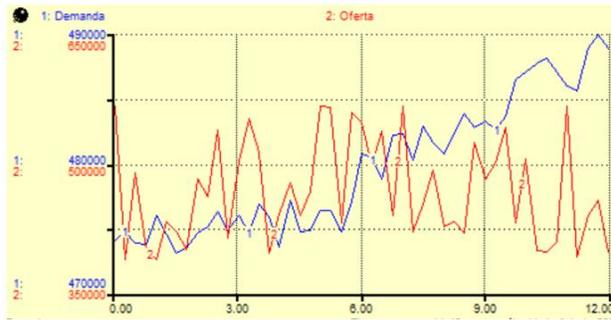


Figura 9: Simulación promedio corridas oferta - demanda.

Demanda	Oferta
482,815.03	524,370.35
483,240.90	482,263.23
482,565.08	501,764.81
483,660.63	541,941.32
486,509.33	431,142.07
487,097.66	505,146.72
487,741.53	399,420.31
488,192.76	397,594.89
487,117.14	408,954.19
488,039.74	568,926.17
485,636.13	391,998.53
488,974.27	439,711.12
489,984.55	457,596.77

Figura 10: Simulación promedio oferta-demanda.

No obstante, debido al abastecimiento en las fuentes que nutren el sistema hídrico de la ciudad se reducirían de acuerdo con el cambio de la flora y la fauna a consecuencia de la urbanización de la ciudad generando así un mayor déficit como lo analizamos en la tabla 5.

Tabla 5: Resultado escenario tendencial del agua en Huatuco.

Oferta en 2034	457, 596. 77 m <sup>3</sup>
Demanda 2034	489, 984. 55 m <sup>3</sup>
<b>Déficit</b>	<b>-32, 387. 78 m<sup>3</sup></b>

Por fortuna, este escenario tendencial es improbable, dadas las circunstancias de la investigación y con los resultados observados en el modelo dinámico, se lograrán adaptar medidas que ayuden a mejorar el balance hídrico.

### Fase 5: Escenario de balance

Utilizando el modelo en un primer ejercicio de planeación, se podría considerar conveniente iniciar de inmediato, en el mismo año (2022) las acciones de reutilización de aguas, disminuir pérdidas físicas, captar agua pluvial y considerar el uso de plantas tratadoras de aguas residuales.

En la ciudad, se implementaron acciones a corto plazo para revertir el efecto del desabasto de agua, las cuales incluyen el compromiso con la ciudadanía; estas actividades ayudan a preservar el agua de manera íntegra.



Figura 11: Campaña de control de fugas.

Es por ello, que a finales del mes de septiembre del 2022 se presenta y se aprueba dentro de la gaceta oficial con folio 1156, el ajuste del precio del agua dentro de la región de Huatusco, los cuales se empezaran a aplicar en el mes de noviembre y diciembre del año 2022.

Tabla 6: Ajuste de la tarifa del agua.

Tipo de tarifa	Domestica	Comercial	Industrial
<b>Costo Ajustado</b>	\$ 55.92 0 – 15 m <sup>3</sup>	\$ 80.36 0 – 15 m <sup>3</sup>	\$ 251.38 0 – 15 m <sup>3</sup>

Se desarrolló de manera eficiente la campaña de ahorro a partir de la concientización sobre la importancia del agua, con lo cual, la población se adapta al ajuste que la comisión del agua municipal está realizando para brindar un mejor servicio y al mismo tiempo salvaguardar la disponibilidad del agua dentro de la ciudad.



Figura 12: Concientización de la importancia del agua.

Como parte de una estrategia interna del CMAS Huatusco, se generó la Agenda 22-25, con la cual también se participa activamente en pro del medio ambiente con actividades como la reforestación, en donde se localizan lugares y espacios estratégicos que propicien un mejor hábitat para prevalecer nuestros recursos naturales.



Figura 13: Reforestando la ciudad de Huatusco.

La suma de estas estrategias compone el escenario de balance del sistema hídrico para los próximos años, y la representación, una vez hecha la simulación, se obtiene como resultado que en 2025 se lograría, a pesar del crecimiento poblacional, que el sistema alcance el balance, y hacia 2034, el balance sería ligeramente positivo, con lo que se revierte el déficit actual y se cubre de manera satisfactoria el crecimiento en la demanda.

Una vez desarrollado este plan estratégico, se prevé el oportuno abastecimiento del agua en la ciudad de Huatusco, el cual, se debe poner en marcha con la ayuda de la comunidad huatusqueña para su óptimo funcionamiento y así mantener el recurso para nuestras futuras generaciones.

### DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con Singh A [11], se revela que para optimizar el agua no será posible si se manejan variables separadas, es por ello por lo que, se presenta el modelo dinámico ajustado con las variantes que se interrelacionan mejor para cumplir el objetivo de esta investigación, en donde se integra un ciclo de retroalimentación sobre la reforestación y el beneficio que trae el aplicar esta estrategia.

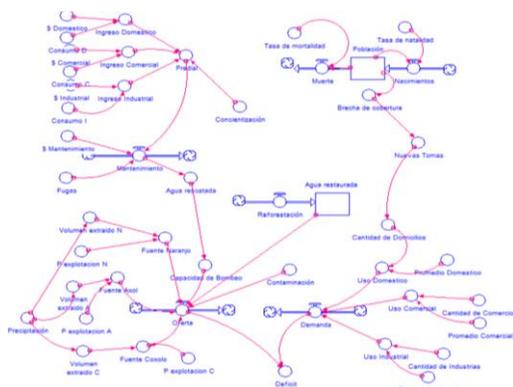


Figura 14: Modelo dinámico ajustado.

Además de lograr implantar en el nuevo sistema los ajustes en la tarifa o cuota de recuperación por el servicio del agua; un escenario diferente al analizado en la investigación de Vergara Castillo, Homero Cortes y Vigorena Merino [12], en donde al mejorar las cuotas se logra reestablecer tuberías y el número de viajes en la asignación del agua consiguiendo así en un mediano plazo un ahorro del 21% en los costos de operación, y en nuestro caso, se mantienen características como el crecimiento de la población, los niveles de precipitación dentro de la zona de las altas montañas para abastecer los caudales y también considerando la disminución de fugas al generar un mayor ingreso económico por los habitantes de acuerdo con la concientización que se lleva a cabo en la actual administración municipal.

Tabla 7: Ajuste de variables.

Variable	Antes	Ajuste
\$ Servicio agua Domestico	\$48.76	\$55.92
\$ Servicio de agua Comercial	\$69.55	\$80.36
\$ Servicio de agua Industrial	\$228.53	\$251.38
Coefficiente de consumo domestico	20 m <sup>3</sup>	15 m <sup>3</sup>
Concientización	6/10 personas pagan predial	8/10 personas pagan predial
% de Fugas en la Red	15%	5%
Capacidad de Bombeo	8 m <sup>3</sup> /s – 12 m <sup>3</sup> /s	10 m <sup>3</sup> /s – 12 m <sup>3</sup> /s
Reforestación	0 km <sup>2</sup>	1.5 km <sup>2</sup>
Recurso restaurado con reforestación	0 L/m <sup>2</sup>	150 L/m <sup>2</sup>
Contaminación	150 – 200 m <sup>3</sup>	100 – 150 m <sup>3</sup>

Una vez realizada la validación del modelo, y siguiendo los pasos en la investigación de Morelos R y Ramírez H. [13], que fue llevada a cabo en el estado de Sonora, México; se deben verificar los resultados obtenidos a partir del software en su caso Epanet y en esta investigación Stella, tal como podemos visualizar en la ilustración 15, el suministro para el año 2034 será adecuado para la población pronosticada dentro de ese mismo periodo con las estrategias aplicadas, siempre y cuando se sigan desarrollando como hasta ahora.

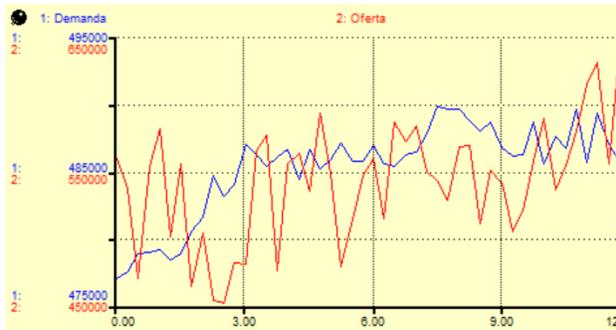


Figura 15: Gráfica simulación Demanda – Oferta con Ajuste.

Demanda	Oferta
479,090.41	626,376.02
478,162.25	537,091.99
479,167.36	584,092.58
479,373.76	667,208.02
480,740.65	562,367.50
482,588.36	649,264.32
482,472.85	549,515.36
482,789.90	635,127.25
480,763.27	705,931.75
479,371.41	714,350.54
483,737.31	599,674.71

Figura 16: Resultados ajuste simulación demanda - oferta.

Como podemos analizar en la figura 16, se muestran los valores de la simulación ajustada de la población pronosticada para el año 2034 y también, se presenta la oferta de agua que existirá, la cual es de 599, 674. 71 m<sup>3</sup> de agua, siempre y cuando se logre generar conciencia del cuidado del recurso líquido que nos abastece a la gran mayoría de nuestras necesidades.

Tal como lo dan a conocer Kourbasis, Patelis, Tsitsifli y Kanakoudis [14], el aumentar el tiempo de vida del agua en conjunto con la reducción de su consumo por parte de la población en Grecia es de gran importancia, pero también es vital que este recurso del que se habla en esta investigación, mantenga la calidad adecuada para conservar la salud de los consumidores; es por ello, que se logra un resultado positivo en este estudio, al obtener un análisis multivariado que mejore la optimización del agua, y con ello la distribución y el consumo se de en un ambiente de cordialidad y calidad.

Tabla 8: Superávit simulado para 2034.

Oferta en 2034	599, 674. 71 m <sup>3</sup>
Demanda 2034	483, 737. 31 m <sup>3</sup>
<b>Superávit</b>	<b>115, 937. 4 m<sup>3</sup></b>

Finalmente, dentro de la tabla 8, se presenta la demanda requerida y la oferta obtenida para el año 2034, considerando dentro de este mismo análisis la obtención de un superávit para la ciudad de Huatusco, el cual es de 115, 937. 4 m<sup>3</sup> de agua restantes de la disponibilidad de agua posterior al suministro del recurso a las familias huatusqueñas, manteniendo así, en existencia el vital líquido para las próximas generaciones.

## CONCLUSIONES

En esta investigación, las ventajas de la modelación de sistemas se aplicaron al caso de la ciudad de Huatusco y su zona urbana, que atiende la Comisión Municipal del Agua y Saneamiento para optimizar la asignación de las aguas en la ciudad. Se analizó el posible efecto del escenario tendencial, y se diseñó y probaron algunas estrategias dentro de un escenario de balance, que demostró la posibilidad de revertir la condición actual del déficit y conducir al sistema a un balance en un periodo que culmina en el año 2034.

La modelación de sistemas dinámicos adaptativos es una metodología útil para la creación de modelos de simulación que permiten el diseño de escenarios, compuestos por una serie de estrategias y valoración de sus resultados en el sistema. En última instancia, se considera como una valiosa herramienta para los encargados de la toma de decisiones dentro de las instituciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mojica Zárate HT, Martínez Martínez CC, Perdomo López ME. Enfoque sostenible-complejo para la gestión integrada de territorios áridos con orientación agroproductiva en México. Universidad y Sociedad [Internet]. 2016. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S218-36202016000200027](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S218-36202016000200027)
- [2] de la Llave HV de I. Compendio de información geográfica municipal 2010 [Internet]. Org.mx. [citado el 1 de junio de 2023]. Disponible en: [http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/30/30071.pdf](http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30071.pdf)
- [3] Aracil J, Gordillo F. Dinámica de sistemas. Madrid: Alianza Editorial. 1997. Disponible en: <http://tiesmexico.cals.cornell.edu/courses/shortcourse5/minisite/pdf/Literatura/Araci%20Gordillo%20DS.pdf>
- [4] Gay A. Los sistemas y el enfoque sistémico. Disponible en: [https://ipet132.com/2020Abril/texto\\_2\\_aquiles\\_gay.pdf](https://ipet132.com/2020Abril/texto_2_aquiles_gay.pdf)
- [5] González Becerra F. Introducción a la dinámica de sistemas en la ingeniería industrial. Universidad Militar Nueva Granada; 2020.
- [6] Johnson N. Simply complexity. A clear guide to complexity theory. 2011.
- [7] Ficot D. Complexity theory and emergence of water recycling. MSc Dissertation. 2009.

[8] Giacomoni MH, Kanta L, Zechman EM. Complex adaptative systems approbach to simulate the sustainability of water resources and urbanization. *Journal of water resources planning and managment.* 2013;139(5):554–64.

[9] Rivera Lozano M. Diseño y evaluación de intervenciones en organizaciones empresariales desde la dinámica de Sistemas. Universidad del Rosario. 2015.

[10] Costa Posada C, Domínguez Calle E, Gonzalo Rivera H, Vanegas Sarmiento R. El índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis ó una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Rev Ing [Internet].* 2005;(22):104–11. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.16924/revinge.22.12>

[11] Singh A. Modelado de simulación-optimización para la gestión conjunta del uso del agua. *Agric Water Manag [Internet].* 2014; 141:23–9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.003>

[12] Vergara C, Homero Cortes M, Vigorena Merino F. Optimización de la distribución de agua potable rural mediante el uso de la programación lineal. En: *Redalyc: Ingeniería Industrial - Actualidad y nuevas tendencias.* 2013.

[13] Morelos RA, Ramírez H. Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable en una ciudad mexicana Epanet. *Revista Iberoamericana de Ciencias.* 2017.

[14] Kourbasis N, Patelis M, Tsitsifli S, Kanakoudis V. Optimizing Water Age and Pressure in Drinking Water Distribution Networks. 2020.

[15] Benavides M. Residuos sólidos: Un enfoque multidisciplinario. *Scientific figure on Research Gate.* 2016.

[16] Miranda T, Ocampo M, Escobedo I, Hernández JF. La distribución del agua potable en Tepexi de Rodríguez, Puebla. *SciELO: agricultura, sociedad y desarrollo.* 2015;261–77.

[17] Vilchis Mata I, Garrocho R, Diaz Delgado CF. Modelo dinámico adaptativo para la toma de decisiones sostenibles en el ciclo hidrosocial urbano en México. *Revista de geografía Norte Grande.* 2018.

[18] Valle Castro AP. Optimización del diseño de redes de distribución de agua potable, usando algoritmos genéticos con tres funciones objetivo. Caso: Viñani - Tacna. 2014.

Curación de los datos	Fernando Hernández Benito
Software	Luis Antonio Calderón Palomares
Supervisión	Martín González Sóbal Miguel Ángel Solís Jiménez Luis Antonio Calderón Palomares
Visualización	Fernando Hernández Benito Martín González Sóbal
Redacción	Fernando Hernández Benito



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

## ROLES DE CONTRIBUCIONES

Rol	Autor (es)
Conceptualización	Fernando Hernández Benito Martín González Sóbal
Metodología	Fernando Hernández Benito Miguel Ángel Solís Jiménez