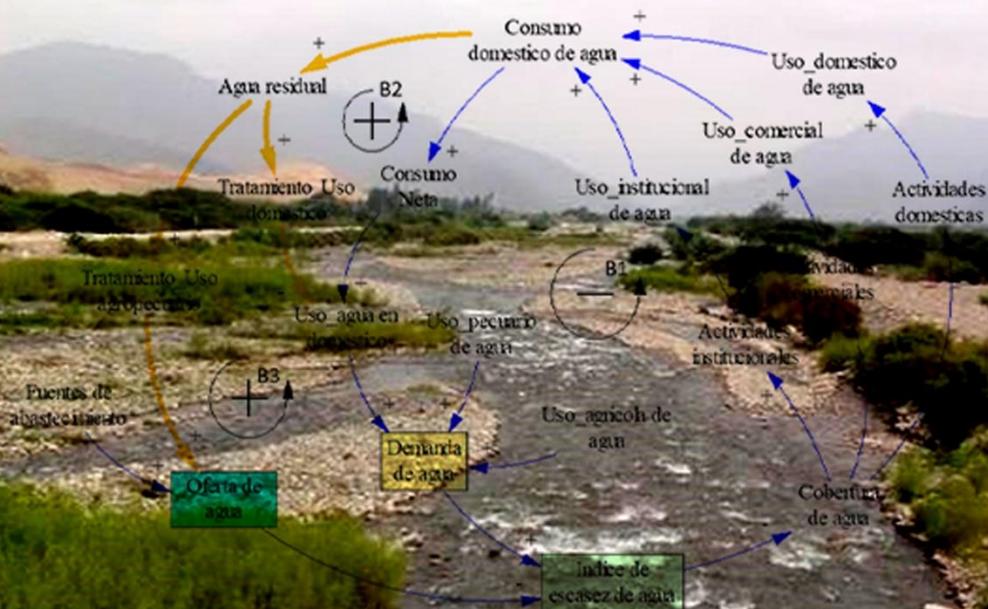


DINÁMICA DE SISTEMAS: MODELAMIENTO DE GESTIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES



Dr. Fernando V. Sinche Crispín
 Mg. Sergio Huincho Lapa
 Dra. Olga Vicentina Pacovilca Alejo
 Dr. John F. Rojas Bujaico

Professionals
 on line S.A.C

DINÁMICA DE SISTEMAS: MODELAMIENTO DE GESTIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES



*Fernando V. Sinche Crispín
Sergio Huincho Lapa
Olga Vicentina Pacovilca Alejo
John F. Rojas Bujaico*

Lima – Perú

2022

DINÁMICA DE SISTEMAS: MODELAMIENTO DE GESTIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES

© Fernando Viterbo Sinche Crispín
Dirección: AV. José Olaya N° 187 Huancayo - Perú
fernando.sinch@unh.edu.pe

Sergio Huincho Lapa
Dirección: Av. Arterial S/N Chilca - Huancayo – Perú
sergio.huincho@unh.edu.pe

Olga Vicentina Pacovilca Alejo
Dirección: Pasaje peatonal N°129- Huancavelica - Perú
olga.pacovilca@unh.edu.pe

John Fredy Rojas Bujaco
Dirección: Jr. Pedro Gálvez N° 593 El Tambo - Huancayo - Perú
john.rojas@unh.edu.pe

Editada por:

© Professionals On Line SAC. (FEPOL) - Fondo Editorial.
Dirección: Av. La Marina Nro: 2900, San Miguel - Perú
professionalsonline.net@gmail.com
Teléf. móvil: +51 999 140 920
Web: <https://professionalsonline.net/>

Coeditor
Biblioteca Nacional del Perú
Dirección: Av. De La Poesía 160, 15034 San Borja - Lima, Perú

Primera edición digital: Enero 2023

Libro digital disponible en: <https://editorialfondo.com/>

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2023-00054

ISBN: 978-612-49189-0-2

DOI: <https://doi.org/10.47422/fepol.11>

Corrección de estilo: Luis Pablo Diaz Tito

luisp.diaz@upsjb.edu.pe / Tel. de contacto: +51 955 129 801

Diseño y Diagramación: Gráfica “imagen”

Manuel Enrique Sampen Antonio

sampen25@gmail.com / Tel. de contacto: +51 990 064 589

Libro resultado de Investigación y con revisión por pares doble ciego.

Sello editorial: Fondo Editorial (978-612-48981)



No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, su tratamiento información, la transmisión de ninguna otra forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del copyright.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se benefició enormemente de los aportes y críticas de colegas y estudiantes. Nuestros mayores agradecimientos para ellos. Particularmente estamos en deuda con los estudiantes excepcionales de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas – Universidad Nacional de Huancavelica, que constantemente nos desafían a hacer que el enfoque de la dinámica de sistemas sea de utilidad. Además, agradecemos a la ***Revista Geográfica de América Central*** por habernos permitido difundir los primeros resultados de este trabajo de investigación.



RESUMEN

El presente trabajo surge de la problemática de gestión de la escasez de aguas superficiales que se evidencian en las grandes ciudades del mundo.

Donde la oferta del agua es cada vez menor frente a una demanda exigida por la población creciente. Del agua dulce disponible en el planeta, solo el 1% escurren por la superficie de la tierra y se encuentran distribuidos en forma desigual, y su escasez es cada vez más evidente (JUMAPAM, 2021). Las regiones del Perú y la Ciudad de Pampas no son ajenas a esta problemática, que requiere ser analizada desde un enfoque de sistemas debido a que los enfoques tradicionales ya no resultan válidos.

El propósito del trabajo es proponer una alternativa de gestión de la escasez de aguas superficiales, haciendo el uso de modelos dinámicos y considerando el índice de escasez de agua como un indicador de alerta de la escasez de aguas superficiales.

El modelo fue construido siguiendo el proceso de modelado de la dinámica de sistemas, basándose de la metodología para el cálculo del índice de la escasez de agua superficial (Gonzalo *et al.*, 2004). Concluyendo, que el modelo propuesto muestra su utilidad

en la comprensión de la complejidad del problema en estudio y como una herramienta de gestión en la toma de decisiones.

Palabras claves: escasez de agua, gestión del agua, modelación dinámica.



INTRODUCCIÓN

El presente libro aborda el problema de gestión de la escasez de aguas superficiales bajo la metodología de dinámica de sistemas. Ya que el agua es un elemento fundamental de desarrollo, es un recurso indispensable para la supervivencia de los seres vivos, y para desarrollar la actividad socioeconómica de los países.

La dinámica de la población mundial, el crecimiento desarrollo socioeconómico y cambios en los modelos de consumo, vienen provocando el aumento de la demanda mundial de agua, con un ritmo de crecimiento del 20 al 30% por encima del nivel actual de uso del agua. Tendencias que tendrían grandes consecuencias para las generaciones venideras, provocando la escasez de aguas superficiales de las cuencas, principalmente en las grandes ciudades de los países en desarrollo.

Las ciudades del Perú no son ajenas a esta problemática, el consumo anual de agua en el desarrollo de sus actividades asciende aproximadamente a unos 20,072 millones de metros cúbicos por año. Sin embargo, en estas actividades se evidencian la falta de conciencia y deficiente gestión sobre los recursos hídricos.

Con este trabajo proponemos una alternativa de gestión de la escasez de aguas superficiales haciendo el uso de modelos

dinámicos que permite tomar decisiones, analizando la oferta hídrica disponible y la demanda como sistemas complejos con una estructura de realimentación dinámica; tomando el índice de escasez de agua como un indicador de alerta de la escasez del agua.

El presente trabajo de investigación se despliega en 4 capítulos, los cuales se explican a continuación:

Capítulo I: Abarca la problemática de gestión de aguas superficiales.

Capítulo II: Abarca el marco teórico, que detalla los temas relacionados a la investigación detallando los aspectos relevantes.

Capítulo III: Abarca el marco metodológico que empleó en la investigación realizada.

Capítulo IV: Abarca el modelamiento de gestión de la escasez de aguas superficiales, los resultados a las que llegó con la investigación.

Con la seguridad de haber aportado con el conocimiento de la dinámica de sistemas en el modelamiento de gestión de la escasez de aguas superficiales, nos permitimos poner en consideración de los señores lectores y poder de recibir sus aportes, críticas y sugerencias a través el correo electrónico.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN	8
Capítulo I.....	12
Problemática de aguas superficiales	12
1.1. El agua	13
1.2. Problema de aguas superficiales.....	13
1.3. Índice de escasez de agua	15
1.4. Gestión de aguas superficiales.....	17
Capítulo II	22
Marco Teórico.....	22
1.5. Sistemas	23
1.6. Propiedad emergente del sistema.....	28
1.7. Tipos de Sistemas	29
1.8. Enfoques de percepción del mundo	31
Capítulo III.....	44

Metodología de dinámica de sistemas	44
Capítulo IV.....	64
Modelamiento de la gestión de aguas superficiales	64
4.1 Área de estudio	65
4.2 Situación problema	66
4.3 Hipótesis dinámica.....	69
4.4 Modelo dinámico	72
4.5 Resultados.....	88
4.6 Discusión de resultados	96
CONCLUSIONES	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

Capítulo I

Problemática de aguas superficiales



1.1. El agua

El agua es un líquido elemento que garantiza la existencia de seres vivos en nuestro planeta tierra, sin embargo, las acciones propias de la humanidad vienen provocando cada vez más su escasez.

El 30% del agua dulce del mundial, se encuentra en la humedad del suelo y en los acuíferos profundos, del cual, solo el 1% escurren por la superficie de la tierra y se encuentran distribuidos en forma desigual, y su escasez es cada vez más evidente (JUMAPAM, 2021). Las regiones del Perú y la Ciudad de Pampas no son ajenas a esta problemática, que requiere ser analizada desde un enfoque de sistemas debido a que los enfoques tradicionales ya no resultan válidos.

1.2. Problema de aguas superficiales

El agua como elemento fundamental de desarrollo es un recurso indispensable para la supervivencia de los seres vivos, los ecosistemas y para la actividad socioeconómica de los países. Razón que ha sido reconocida por las Organizaciones de Naciones Unidas (ONU) como el derecho humano al agua y al saneamiento, plasmado entre los objetivos de desarrollo sostenible al año 2030 que indica “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión

sostenible y el saneamiento para todos” (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2016, p.19).

La dinámica de la población mundial para la Organización de Naciones Unidas (ONU, 2019), aumentará en 2.000 millones de personas para el año 2050 y cerca de 11.000 millones para 2100. Que provocaría el aumento de la demanda mundial de agua hacia el año 2050, con un ritmo de crecimiento del 20 al 30% por encima del nivel actual de uso del agua, impulsado por una combinación; del aumento de la población, desarrollo socioeconómico y cambios en los modelos de consumo (UNESCO, 2019). Estas tendencias tendrían grandes consecuencias para las generaciones venideras, provocando la escasez de aguas superficiales de las cuencas, principalmente en las grandes ciudades de los países en desarrollo.

El Perú no es ajeno a estas tendencias, que según Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2018) alcanza una población de 31 millones 237 mil 385 habitantes, y las proyecciones indican que la población en el año 2021 llegaría a 33 millones 149 mil habitantes. El consumo anual de agua asciende aproximadamente a unos 20,072 millones de metros cúbicos por año, de los cuales 80% es empleado en actividades agrícolas, 18% en servicios de agua potable y alcantarillado y usos industriales, 2%

empleado en la industria minera y el restante en uso no consuntivo (Laclette y Zúñiga, 2012). En estas actividades se evidencian la falta de conciencia y deficiente gestión sobre los recursos hídricos, así como, la actividad agrícola a través de uso de las pesticidas y fertilizantes en los campos de cultivo contribuyen a la contaminación de los cursos de agua; en las actividades tipo domésticas, comerciales e institucionales, la mayor parte de aguas residuales sin tratamiento alguno son vertidas a los cauces de los ríos. Estos factores vienen ocasionando cada vez más la escasez de aguas superficiales en el país. Situaciones que permiten pensar en herramientas que ayuden realizar una gestión eficiente de los recursos hídricos. Dado que, en el Perú, las políticas de gestión de recursos hídricos establecidas por el Ministerio de la Agricultura MINAGRI (2015) no conduce a un manejo eficiente del agua, toda vez que las metas perseguidas son muy amplias, generando una descoordinación institucional; con carencia de métodos, y criterios de trabajo que no tienen resultados sinérgicos.

1.3. Índice de escasez de agua

La escasez de agua es la condición en la cual la demanda de este recurso no puede ser satisfecha. Un fenómeno causado por las actividades desarrolladas por los seres humanos y por la

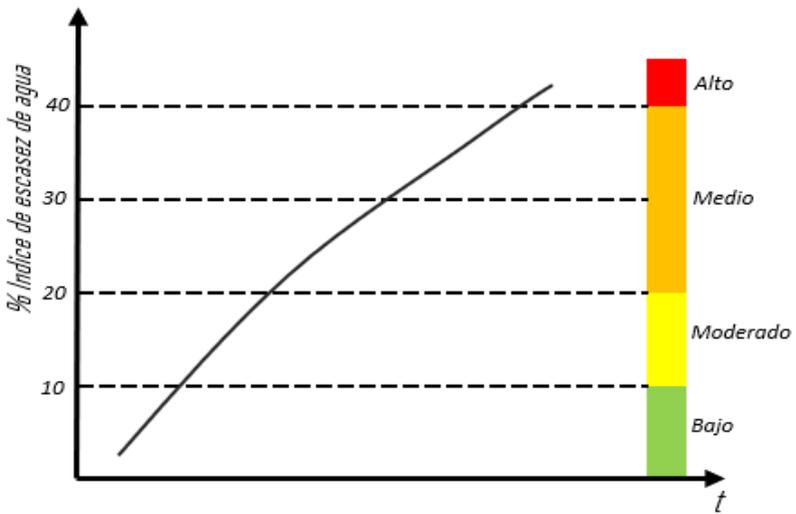
variabilidad hidrológica, que se manifiesta en los países con tasas elevadas de crecimiento poblacional. Al respecto, Gonzalo *et al.* (2004) establece una metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial, determinada de la relación porcentual entre la oferta disponible en las fuentes abastecedoras y la demanda de agua del conjunto de actividades sociales y económicas. Se distinguen umbrales críticos a través de cuatro categorías:

- **Alta:** cuando la demanda supera el 40% del agua disponible. Donde la oferta y la demanda requiere acciones urgentes para aumentar la oferta y/o reducir la demanda.
- **Medio:** cuando la demanda se encuentra entre el 20 y 40% del agua disponible y se requiere tomar prioridades a los distintos usos, así como una inversión para mejorar la eficiencia en su utilización.
- **Moderado:** cuando los requerimientos de agua están entre el 10 y 20% del agua disponible, indica que la disponibilidad de agua se está convirtiendo en un factor limitador del desarrollo, requiriendo esfuerzos para aumentar la oferta y reducir la demanda.

- *Baja*: cuando la demanda de agua es inferior al 10% del agua disponible, indica que no experimenta presión importante sobre el recurso hídrico, (ver figura 2).

Figura 1

Modo de comportamiento del índice de la escasez de agua. Fuente: elaboración propia



1.4. Gestión de aguas superficiales

La gestión de aguas superficiales muestra su mayor importancia en los tiempos actuales. Los actores gubernamentales como tomadores de decisión sobre la asignación del agua enfrentan cada vez mayor responsabilidad y compromiso con su localidad,

debido a que la oferta del agua disminuye frente a una demanda exigida por la población creciente. La complejidad dinámica de los factores demográficos y climáticos también incrementan la presión sobre los recursos hídricos.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es un enfoque holístico, aceptado internacionalmente para el desarrollo y gestión eficiente, equitativo y sostenible de los recursos hídricos que cada vez es más limitado. Para Global Water Partnership GWP (2009) la gestión integrada de los recursos hídricos es: “un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinado; del agua, del suelo y los otros recursos relacionados, a fin de maximizar resultados económicos y bienestar social de forma equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (p. 03). La GIRH integra el sistema natural con el sistema humano, el primero considera la importancia de la calidad y la disponibilidad del agua, y el segundo determina las características del uso y manejo del agua. Para MINAGRI (2010) en el ámbito de la cuenca hidrográfica define la gestión integrada de los recursos hídricos como: “un proceso que promueve, el manejo y desarrollo coordinado del uso y aprovechamiento multisectorial del agua con los recursos naturales vinculados a esta,

orientado a lograr el desarrollo sostenible del país sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas" (p.3).

Por otro lado, Martínez y Villalejo (2018) consideran la gestión integrada de los recursos hídricos GIRH desde una perspectiva multidisciplinaria como: “el manejo del agua superficial y subterránea, en sentido cualitativo, cuantitativo y ecológico, vinculando sus disponibilidades con las necesidades y las demandas de la sociedad relacionadas con el agua” (p. 60). Adicionalmente considera que el núcleo del problema se encuentra en la inadecuada gestión y gobernabilidad de los recursos hídricos (la ineficiencia y el uso no coordinado del recurso hídrico). Por su lado Martínez y Vargas (2016) concluyen "los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento son sistemas complejos, formado por múltiples variables interconectadas que exhiben retroalimentación y conductas emergentes" (p.153).

Estas características requieren buscar otras visiones como señala Hernández y Posada (2018) “enfoques que buscan abordar la gestión del agua de una manera integral, reconociendo el papel que cumple el agua en los ecosistemas y en asociar su gestión a su manejo, con una perspectiva integral” (p. 554); así como el enfoque holístico, donde los temas hídricos sean tratados de forma

integrada, mas no como eventos aislados. Asimismo, Moreira *et al.* (2020) señala que para proponer medidas y acciones de planificación ambiental y manejo integrado que busquen la preservación de las aguas, minimizando los impactos causados por las actividades socioeconómicas que en esta se llevan a cabo, es fundamental comprender las cuencas hidrográficas como unidades sistémicas.

Entonces, la gestión de recursos hídricos es un sistema complejo, que, para comprender y buscar mejores soluciones el tradicional enfoque asistémico (el pensamiento lineal causa-efecto) ya no resulta válido; y se hace esencial la búsqueda de otros enfoques, donde los temas hídricos sean tratados de forma integrada.

El enfoque sistémico que consiste describir el mundo holísticamente en termino de totalidades, es esencial para abordar la complejidad dinámica de gestión de recursos hídricos, debido básicamente a que existen bucles de realimentación entre los elementos relacionados a la demanda y oferta del agua.

La metodología empleada por la misma naturaleza compleja del problema, fue la dinámica de sistemas, una metodología del enfoque sistémico más empleada para la modelación de entornos

complejos, y en recursos hídricos en particular. La metodología contiene un conjunto de herramientas que permiten comprender la estructura y la complejidad de los sistemas.

La dinámica de sistemas, como una metodología del enfoque sistémico para modelar el comportamiento de sistemas complejos, es una herramienta útil para abordar el problema de gestión de la escasez de recursos hídricos. Por ello, en este trabajo proponemos una alternativa de gestión de la escasez de aguas superficiales haciendo el uso de modelos dinámicos y el índice de escasez de agua. El primero, permite tomar decisiones, analizando la oferta hídrica disponible y la demanda como sistemas complejos con una estructura de realimentación dinámica; y el segundo, sirva como un indicador de alerta de la escasez de agua.

Capítulo II

Marco Teórico

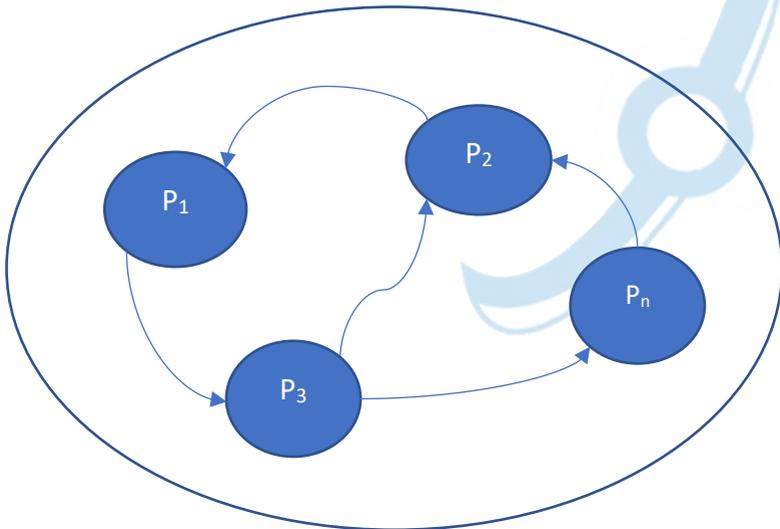


1.5. Sistemas

Etimológicamente la palabra *sistemas* tiene raíces latín *systema* y de griego *σύστημα*, que significan unión de cosas en una manera organizada. Esto sugiere que el termino se trata de conjuntos ordenados e interrelacionados de elementos, cosas, variables, funciones, conocimientos o ideas, que pueden ser abstractas o físicas. Los mismos pueden ser representados como la figura 02. Donde los P son elementos y las flechas son enlaces o relaciones, que todos interrelacionados forman un sistema S para cumplir un propósito sinérgico, como un *todo*.

Figura 02

Representación de un sistema S.



Para (Von Bertalanffy, 1968), considerado padre de la Teoría General de Sistemas, un sistema es definida como “un conjunto de elementos interrelacionados”. Por otro lado, (Aracil , 1995), afirma que un sistema “es un objeto dotado de alguna complejidad, formado por partes coordinadas, de modo que el conjunto posea una cierta unidad, que es precisamente el sistema”.

Desde la perspectiva de dinámica de sistemas los elementos, por ende, los sistemas, sufren un constante cambio. Por su puesto, su explicación es matemática, y a través el sistema de ecuaciones diferenciales es una manera de ilustrar.

En caso simple, tomando como ejemplo el sistema S de la figura 01, denotamos por Q_i alguna magnitud de elementos P_i ($i=1, 2, 3, \dots n$), para un número finito de elementos, las ecuaciones tendrán la forma.

$$\frac{dQ_1}{dt} = f_1(Q_1, Q_2, Q_3, \dots Q_n)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = f_2(Q_1, Q_2, Q_3, \dots Q_n)$$

.....

$$\frac{dQ_n}{dt} = f_n(Q_1, Q_2, Q_3, \dots Q_n)$$

Esto refiere, el cambio de cualquier magnitud Q_i es función de todas las Q , de Q_1 a Q_n , asimismo a la inversa, el cambio de cualquier Q_i acarrea cambio en todas las demás magnitudes y en el sistema en conjunto.

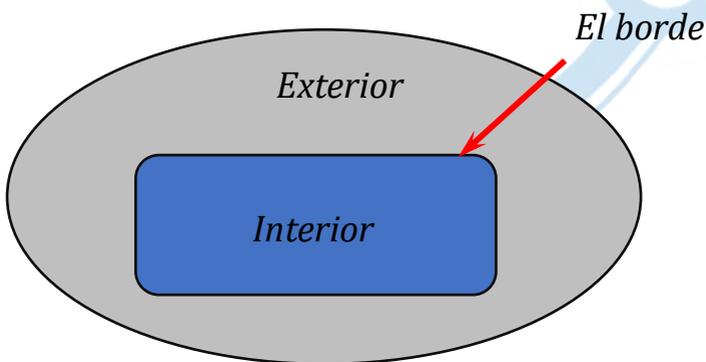
Con estas ecuaciones se explica el carácter holístico de un sistema, que “el todo es más que la suma de sus partes”, en que los cambios de cualquier Q_i no son explicables a partir de las características de partes aisladas. Así, el cambio del todo S , comparadas con las de las Q_i , es resultado de los cambios que emergen de las interrelaciones de las Q_i , “propiedades emergentes o nuevas”, explicados con más detalle en el apartado 2.2.

Basados a las definiciones mencionados, podemos describir algunos ejemplos, un sistema planetario, formado por los planetas unidos mediante las fuerzas gravitatorias. Un sistema económico, formado por agentes económicos, relacionados entre sí. Una empresa, en la que los distintos departamentos se coordinan en la organización empresarial. Una máquina, cuyas diferentes partes interactúan para lograr el fin para el que ha sido concebida. Un sistema tecnológico, que muestra un conjunto de procedimientos, métodos y técnicas, que interactúan para facilitar el trabajo del hombre dentro de un contexto de acción.

A los sistemas su nombre distingue de su entorno que los rodea, esto no quiere decir que su existencia es aislada de ello, sino, mantiene en constante interacción con él. El nombre separa de su *entorno* sus partes y relaciones, y logrando precisar, cuál es su *borde* del sistema. Entonces, nombrar sistemas o dar nombre a un sistema consiste distinguir automáticamente sus partes y relaciones de acuerdo con un propósito que le asignamos. Por ejemplo, al hablar de un *sistema automóvil*, referimos a un conjunto de frenos, componentes eléctricos y mecánicos unidos para realizar el transporte de personas. A través la figura 3, representamos la distinción del sistema de su entorno limitado por el borde que separa el interior de los de exterior.

Figura 3

Límites del sistema

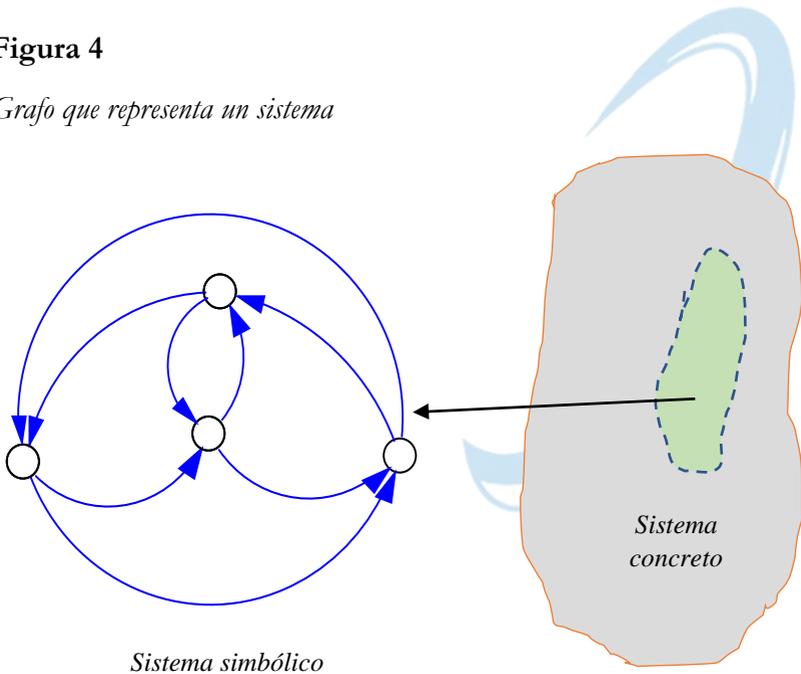


En la dinámica de sistemas, un sistema, es un cierto aspecto de la realidad al que podemos adscribir una descripción de sus partes que componen y las interacciones entre ellas que suministre un vínculo que las organice en la unidad, (Aracil, 1997). Con la figura 4, ilustramos esta definición.

Donde realizamos una descripción más elemental de un sistema concreto, a través un sistema simbólico (grafo), expresando el conjunto de sus partes y la relación que establece el vínculo entre ellas.

Figura 4

Grafo que representa un sistema



1.6. Propiedad emergente del sistema

Son propiedades de los sistemas complejos que no se aprecian en los componentes aislados, sino se hacen evidentes únicamente cuando coexisten o se interrelacionan los componentes en un espacio dado.

Basándonos de *Aristóteles*, “la propiedad de todo generado es mayor que la suma de las propiedades individuales de dichos elementos que conforman el sistema”.

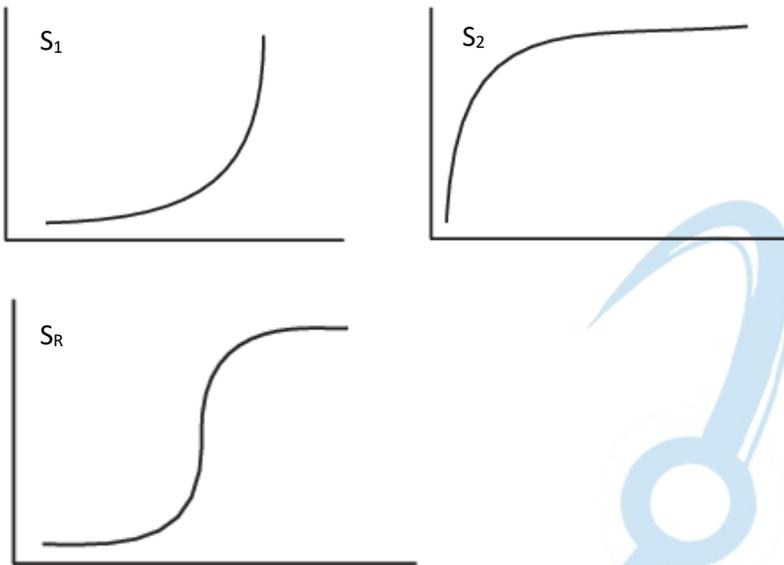
Algunos ejemplos de propiedades emergentes son, el resultado de trabajo en equipo es mayor que el trabajo aislado de sus miembros, el movimiento de un coche emerge de la relación entre el carburador y del depósito de gasolina. Cuando la lluvia, la atmósfera y el sol se encuentran en la posición adecuada emerge el arcoíris.

En la dinámica de sistemas las propiedades emergentes se observan en los comportamientos generados por las variables y sus interrelaciones. De manera de ejemplo, suponemos que un sistema S_1 tiene un modo de comportamiento de forma de crecimiento exponencial; el sistema S_2 tiene un modo de comportamiento de forma de búsqueda de objetivos. El modo de comportamiento

resultante de la relación entre los sistemas S_1 y S_2 será la forma S_R , el comportamiento que no se aprecia aisladamente.

Figura 5

Propiedades emergentes del sistema



1.7. Tipos de Sistemas

En el mundo real existen una variedad de tipos de sistemas, que pueden ser clasificados según fines de estudios. Para nosotros, con fines de comprender los propósitos de la dinámica de sistemas, los sistemas podemos clasificar según a su constitución, que son,

los Sistemas físicos o concretos y los Sistemas simbólicos o formales. Según su movimiento podemos clasificar entre sistemas dinámicos y sistemas estáticos. Y según el número de elementos que los conforman se clasifican entre los sistemas simples y sistemas complejos.

Según su constitución:

- **Sistemas físicos o concretos:** son sistemas tangibles compuestos por equipos, maquinaria, objetos y cosas reales. Entre ellos, sistema computacional, sistema automóvil, el planeta, la organización etc.

- **Sistemas simbólicos o formales:** son sistemas compuestos por objetos abstractos (símbolos y relaciones). Muchas veces solo existen en el pensamiento de las personas. Los sistemas formales aportan los útiles (instrumentos) con los que representar a esos sistemas concretos que forman nuestro entorno.

Según su movimiento:

- **Sistemas dinámicos:** estos sistemas se caracterizan por su evolución a lo largo el tiempo, que están en constante cambio. Por ejemplo: la población, una célula, la economía, etc.

- **Sistemas estáticos.** Estos sistemas se caracterizan por carecer de movimiento, estar en constante reposo, no sufre de cambio. Algunos de manera de ejemplo, aunque son muy escasos, podemos señalar a una roca.

Según el número de elementos que lo conforman:

- **Sistemas complejos:** se caracterizan por estar compuestos por gran cantidad de elementos o subsistemas interrelacionados. Tienen una estructura entrelazada de varios bucles de retroalimentación, lo que vuelve difícil de predecir su estado.

- **Sistemas simples:** a diferencia de los anteriores, éstos cuentan con mínima cantidad de elementos interrelacionados. Tienen una estructura simple, lo que permite fácilmente predecir su estado.

1.8. Enfoques de percepción del mundo

Los cambios acelerados en la tecnología, la población, económica, social y ambiental están transformando nuestro mundo donde que vivimos, con el crece la complejidad de los sistemas. En un ambiente de alta complejidad, las personas que buscan resolver un problema a menudo lo empeoran. Las políticas

implantadas muchas veces generan efectos secundarios imprevistos en la situación.

Algunos ejemplos podemos señalar: La tecnología de la información no ha logrado reducir el uso de papel en las instituciones, más al contrario, el consumo de papel per cápita ha aumentado. Los programas de construcción de carreteras que son diseñados para reducir la congestión vehicular, han aumentado el tráfico, las demoras y la contaminación del medio ambiente. Las medidas del gobierno peruano, implementadas para reducir los contagios del COVID 19 durante el año 2020, lo han empeorado la situación, el número de contagios más aún se ha incrementado empeorando la situación.

En sistemas con complejidad dinámica, nuestras decisiones pueden provocar reacciones por parte de otros que buscan restablecer el equilibrio que transformamos.

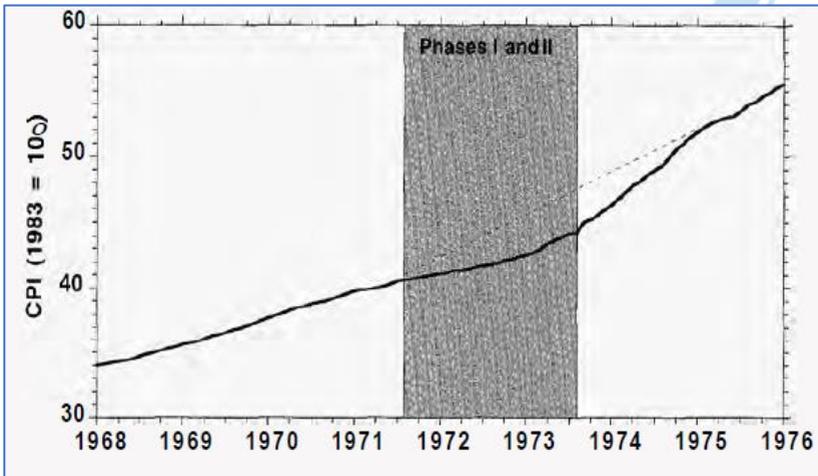
Provocando comportamientos contradictorios, que conduce a la resistencia política. Como ejemplo de resistencia política podemos tomar de (Sterman, 2000), la lucha del gobierno de Estados Unidos contra la inflación, que entre las décadas 1960 hasta 1970 se aceleraba la inflación, obligando al gobierno norteamericano tomar medidas de controlar los precios y salarios.

Los primeros años las medidas pareció funcionar, sintieron que la inflación volvería a su tasa anterior. Sin embargo, la inflación se aceleró hasta que, en 1975, el IPC volvió a la trayectoria en la que se encontraba antes de la imposición de los controles de precios (ver figura 6).

Para aprender a evitarlo los comportamientos contradictorios es necesario cambiar nuestros paradigmas tradicionales que nos limita comprender los sistemas con alta complejidad.

Figura 6

Resistencia de las políticas en la lucha contra la inflación de EE.UU. (Stermán, 2000)



En el mundo que vivimos existen dos tipos de enfoques o pensamientos que dominan nuestra forma de observar, interpretar y solucionar las situaciones problema. Los cuales luchan a diario para lograr los espacios de aplicación que lleven a los resultados esperados. Referimos al pensamiento lineal y pensamiento circular, este último es el pensamiento de sistemas.

- **Pensamiento lineal**

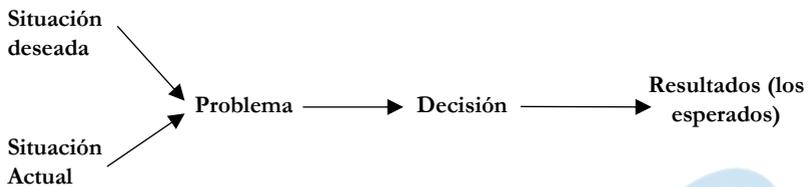
Aprendemos desde una edad temprana la cosmovisión orientada a eventos. Interpretar los problemas como una serie de eventos. Por ejemplo, “los ingresantes a la universidad disminuyeron este año” o “el número de contagios de covid 19 incrementaron.” Que cada evento tiene una causa, que a su vez es un efecto de alguna causa aún anterior. Por ejemplo: *“Los ingresantes a la universidad disminuyeron porque apareció una competencia. La competencia apareció porque...”*, otro ejemplo, *“el número de contagios de covid 19 incrementaron porque hubo relajamiento en la población. Hubo relajamiento de la población porque las necesidades económicas de la población incrementaron”*.

Asimismo, la cosmovisión orientada a eventos conduce a un enfoque orientado a eventos para la resolución de problemas. Que consiste alcanzar la meta en corto plazo. Pero en el largo plazo

terminan por crear el resultado contrario, efectos secundarios. Esta es la forma en que nos enseñaron, y esta es la forma en que solemos abordar los problemas e implementar la solución (ver figura 7).

Figura 7

La cosmovisión orientada a eventos



Podemos ilustrar con un ejemplo de caída de las ventas de un producto de una empresa. Imaginemos que en una empresa la venta de sus productos cayó a 70% durante el último mes, la brecha de 30% de la meta mensual define el problema. Ante ese problema se toma la decisión de disminuir el precio de sus productos, con esta acción probablemente se logra alcanzar la meta establecida. En cambio, es posible que el sistema reaccione a su solución, que a medida que aumentan sus ventas los competidores reducirán los precios y las ventas de la empresa volverán a caer. La empresa responderá reduciendo aún más el precio de sus productos y la

competencia reaccionará con lo mismo, y las ventas de la empresa volverán a caer.

Esta es la forma de abordar tradicionalmente el problema: *Miras el problema, encuentras la solución y la implementas.* A veces, la solución directa puede ser peor que el problema. La cura es peor que la enfermedad original, porque a veces las decisiones que tomamos se conocen como decisiones miopes.

El paradigma lineal es la base de paradigma positivismo. Que para comprender los fenómenos separa sus partes, minimizando la comprensión del todo, olvidando el fundamento de la interdependencia y el poder que las partes ejercen sobre el todo. Tomemos como ejemplo la dicotomía árbol - selva. El positivismo entiende el árbol, pero no entiende la selva. Se enfoca solo en la parte y, por lo tanto, ignora la influencia de todo sobre ella. Por otro lado, se enfoca solo en el todo (la selva) e ignora la parte (el árbol).

- **Pensamiento circular**

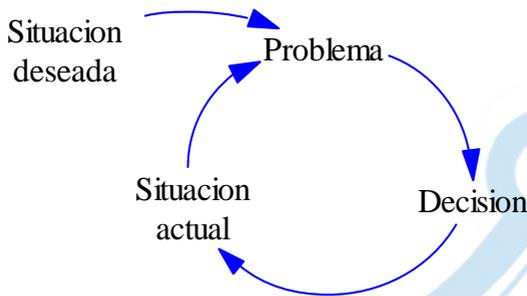
La otra forma de abordar el problema es el pensamiento circular. El pensamiento que contempla el todo y las partes, así como las conexiones entre las partes y estudia el todo. El pensamiento circular, es pensar más allá de su problema inmediato,

pensar en el problema más grande, pensar en los otros efectos que podrían surgir de su decisión.

El pensamiento circular percibe la existencia de retroalimentaciones en los sistemas, que explican cómo los resultados de nuestras propias acciones definen la situación que enfrentamos en el futuro. En la figura 8, podemos observar que nuestras decisiones alteran nuestro problema actual, dando lugar a nuevas decisiones.

Figura 8

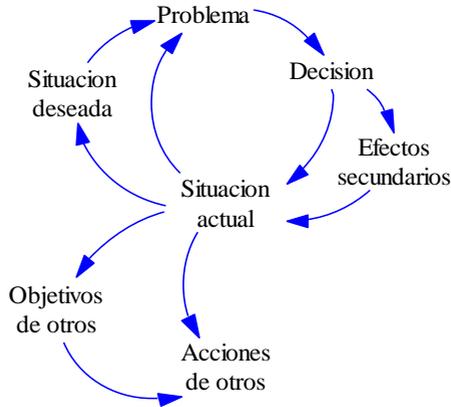
Enfoque del pensamiento circular



En la figura 9 se observa que a medida que nuestras decisiones alteran el estado actual del sistema, otras personas reaccionan para restablecer el equilibrio que hemos alterado. Y nuestras decisiones también pueden provocar efectos secundarios.

Figura 9

Enfoque del pensamiento circular



El anterior nos lleva a concluir, que las acciones humanas forman parte del proceso de realimentación, no está aislado de él. Como los ecologistas sostienen que el hombre es parte de la naturaleza; el hombre con sus acciones influye sobre la naturaleza y a la vez recibimos una influencia sobre nosotros. Para ver la existencia de la influencia reciproca en la realidad, se requiere un cambio de enfoque de visión lineal a un enfoque de visión circular. ¿Pero qué es una realimentación? Es uno de los conceptos centrales de la dinámica de sistemas. En el pensamiento sistémico con este término aludimos a todo flujo reciproco de influencia

entre las variables que forman la estructura de un sistema (ver figura 9).

Estas retroalimentaciones son causantes de la resistencia política, como afirma (Sterman, 2000), “*La resistencia a las políticas surge porque a menudo no comprendemos la gama completa de retroalimentaciones que operan en el sistema*”.

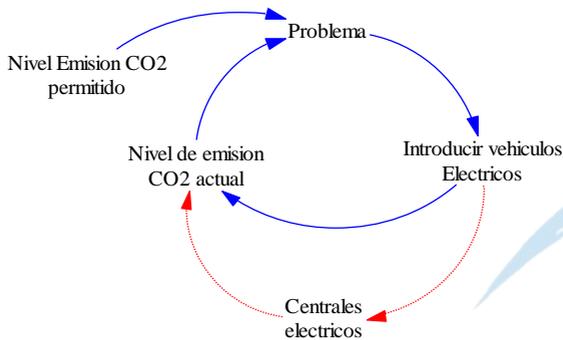
En la figura 9 observamos que nuestras decisiones pueden provocar dos efectos. *Los efectos principales*: los efectos que pensamos de antemano, los efectos previstos. Y *Los efectos secundarios*: Los efectos que no anticipamos, los efectos que retroalimentaron para socavar, retrasar, diluir y derrotar las intervenciones nuestras políticas. Estos efectos no son parte de la realidad, sino una señal de que nuestra comprensión del sistema es limitada. Un ejemplo de efectos secundarios podríamos percibir cuando introducimos los vehículos eléctricos al mercado para reducir el nivel de la contaminación del aire con la emisión de CO₂.

Es probable que esta medida reducirá automóviles con tubos de escape, en consecuencia, menor emisión de CO₂. Sin embargo, los vehículos eléctricos requerirán más centrales eléctricas para producir la electricidad necesaria, al mismo tiempo su funcionamiento genera emisión de CO₂, incrementando la

contaminación. Efecto secundario que no se ha previsto al momento de introducir vehículos eléctricos como medida de reducir la emisión de CO₂ al aire.

Figura 10

Ejemplo de efectos de las decisiones



- Pensamiento sistémico

Tomando los planteamientos de (Checkland & Scholes, 1994) quien en sus estudios de situaciones blandas lo define: “Un pensamiento sistémico arranca de un observador que describe el mundo que está fuera de nosotros y quien, por alguna razón personal, desea describirlo “holísticamente”.

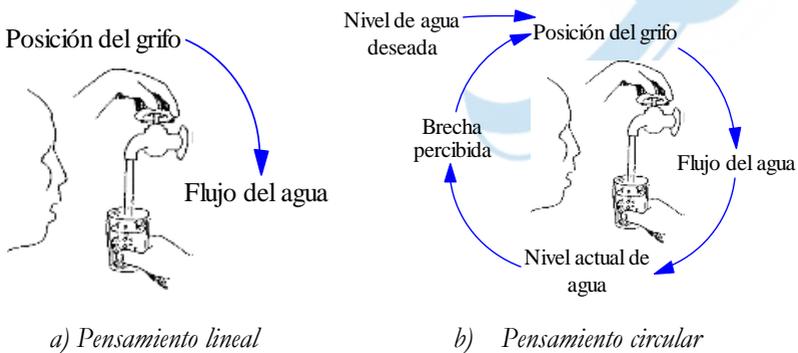
Con describirlo el mundo real “holísticamente”, se refiere a describir o ver en términos de sistemas, de unidades totales (o totalidades) enlazadas en jerarquías con otras unidades totales.

Y analizando desde la otra orilla, el pensamiento sistémico es una forma de pensar más circular que lo lineal. Como señala (Senge, 1998), el pensamiento sistémico es una disciplina para ver totalidades en vez de partes. Para ver interrelaciones en vez de cosas, para ver patrones de cambio en vez de “instantáneas” estáticas.

A través un ejemplo de proceso de llenar un vaso con agua podemos distinguir el pensamiento lineal y el pensamiento sistémico. En lado a) Pensamiento lineal, que muestra una influencia en una sola dirección, aislada del todo, y b) Pensamiento sistémico, que muestra una influencia circular entre las variables que participan en el todo.

Figura 10

Diferencia entre el pensar lineal y circular



El pensamiento sistémico es una disciplina para ver las “estructuras” que subyacen de las situaciones complejas, y para entender cambios de alto y bajo apalancamiento. Para la cual, hay que comprender la complejidad dinámica, no la complejidad de los detalles.

En fin, el pensamiento sistémico es interdisciplinaria ya que abarca campos tan diversos como las ciencias físicas y sociales, la ingeniería y la administración de empresas.

Se necesita de pensamiento sistémico para comprender la creciente complejidad del calentamiento global, el narcotráfico, la economía del país, el conflicto armado, etc.

Incluye una variedad de métodos y herramientas, orientados a examinar la estructura dinámica de un sistema, una de ellas es la *dinámica de sistemas*.

El pensamiento sistémico podemos aplicar en las protestas sociales en contra los problemas de la corrupción.

La situación analizada desde la perspectiva lineal, no observa los efectos secundarios que empeoran la situación. Sin embargo, desde una perspectiva sistémica, esta situación problema forma un sistema (un conjunto de variables que se influyen

mutuamente), evidenciando que las acciones creadas para solucionar el problema en realidad empeoran la situación o crean nuevos problemas. Características que no observamos desde la perspectiva lineal.

Figura 11

La perspectiva Lineal

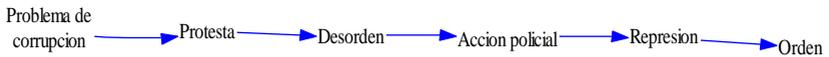
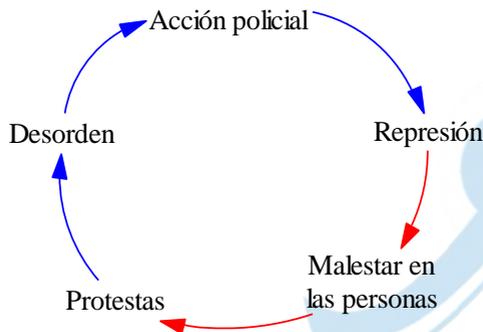


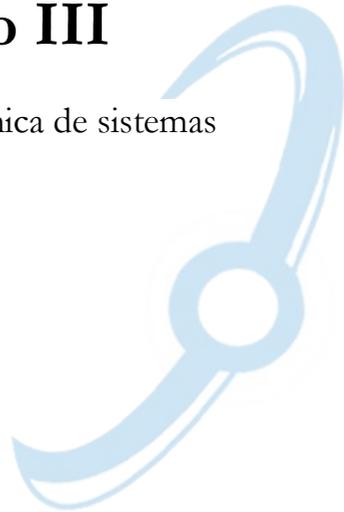
Figura 12

La perspectiva sistémica



Capítulo III

Metodología de dinámica de sistemas



Dinámica de sistemas es una metodología que fue creada por el Prof. Jay Forrester en el Instituto Tecnológico de Massachusetts MIT de EE. UU de Norteamérica. Una metodología que utiliza la teoría de la retroalimentación y el control de la información para evaluar los sistemas complejos.

1.9. Fundamentos Filosóficos

Esta disciplina nace como un enfoque determinista, situándose en el lado duro del enfoque de sistemas, considera que los sistemas existen en el mundo real, donde los problemas y las soluciones se distinguen claramente. Aunque el mundo real exhibe un alto grado de complejidad, es posible capturar y representar en un modelo que debe contener esas complejidades y múltiples bucles de retroalimentación.

En los últimos años esta disciplina ha sido reubicado, como refiere (Rodríguez Ulloa & Paucar Caceres, 2005) el paradigma de la dinámica de sistemas ha sido movido a lado de la sociología, un paradigma interpretativismo mucho más suave.

1.10. Dinámica de sistemas

La mayor constante de los tiempos actuales es el cambio. Los cambios acelerados en la tecnología, la población y la actividad

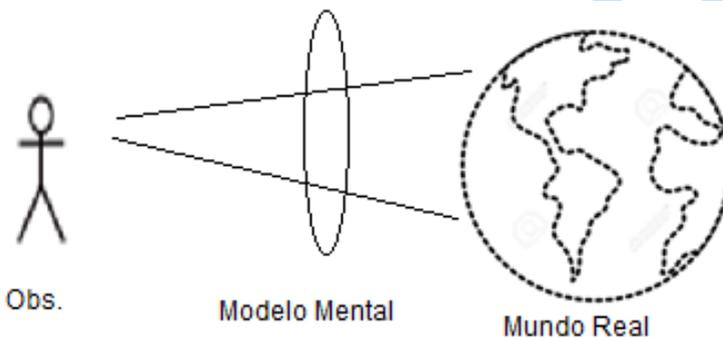
económica están transformando nuestro mundo, al mismo tiempo crece la complejidad de los sistemas. Algunos de los cambios que observamos en el mundo real, son maravillosos; y otros cada vez más amenazan nuestra supervivencia.

La toma de decisiones y aprendizaje efectivos en un mundo de constante cambio y creciente complejidad dinámica requieren que nos convirtamos en *pensadores de sistemas*, para expandir los límites de nuestros modelos mentales, que limitan comprender cómo la estructura de sistemas complejos crea su comportamiento.

La figura 13, muestra la forma en que los modelos mentales condicionan la forma de observar el mundo real.

Figura 13

Modelos mentales



Entonces, la dinámica del sistema es un método para estudiar el comportamiento de sistemas complejos mediante la construcción de modelos de simulación informática.

Para (Stermán, 2000), la dinámica de sistemas es un método que desarrolla modelos de simulación para mejorar el aprendizaje en sistemas complejos, para comprender las fuentes de resistencia de la política, y diseñar políticas más eficaces. Así como una aerolínea utiliza simuladores de vuelo para ayudar a los pilotos a aprender.

La dinámica de sistemas es una perspectiva y un conjunto de herramientas conceptuales que permiten comprender la estructura y dinámica de sistemas complejos.

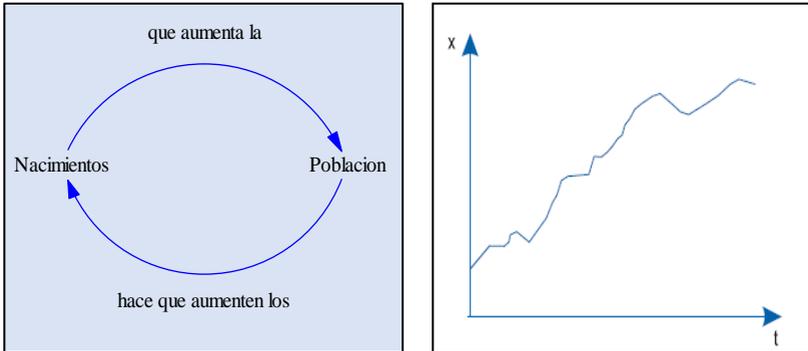
En la figura 14, el punto (a). Representa la estructura de un sistema complejo, de un sistema demográfico, y el (b) representa la dinámica de a lo largo del tiempo de los atributos que conforma el sistema.

1.11. Modelo

En este punto es menester definir el término “modelo”, ya que, como mencionamos uno de los propósitos principales de la dinámica de sistemas es construir un modelo de simulación.

Figura 14

La estructura y comportamiento de sistemas complejos



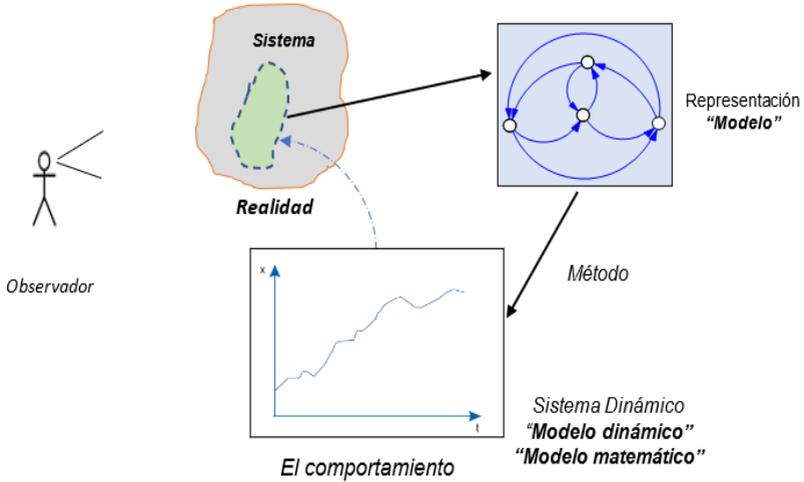
(a) *Grafo de un sistema demográfico* (b) *comportamiento del sistema*

Para la Real Academia Española un modelo “es una representación en pequeño de alguna cosa”, también, “Arquetipo o punto de referencia para imitarlo o reproducirlo.” Para (Aracil & Gordillo, 1998), un modelo es un objeto que representa a otro, sirve como:

Un instrumento que ayuda al observador a responder preguntas acerca de un aspecto de la realidad (sistema concreto), una ayuda para la toma de decisiones, y resolver un problema en concreto.

Figura 16

El modelo que representa la realidad



En la figura 16, ilustramos a través un proceso de modelado cómo el observador representa la estructura y el comportamiento de los atributos de una realidad.

En la dinámica de sistemas un modelo: “es un esquema teórico de forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento”.

Un modelo no es una copia de aquel aspecto, sino que está asociada a una interpretación de la realidad. El modelo describe un cierto fenómeno o proceso del sistema. El modelo recogerá sólo aquellos aspectos, que un observador en su opinión y según buen saber y entender, considera relevantes.

1.12. Herramientas de la dinámica de sistemas

Las herramientas básicas de la Dinámica de Sistemas son: El diagrama de bucle causal, los gráficos de comportamiento a lo largo del tiempo, los diagramas de stock y flujo y los modelos de simulación.

a. Diagrama de influencias

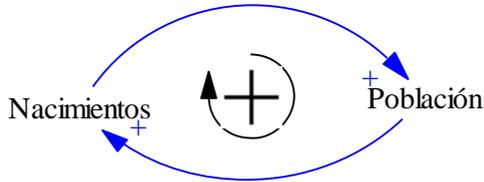
Llamado también diagrama de influencias. En este diagrama se crea bucles de realimentación. Es una forma de mirar las entidades y sus interrelaciones entre ellas, si estos ¿aumentan o disminuyen? a lo largo el tiempo.

Un caso clásico y familiar de todos es, el diagrama formado entre nacimientos y la población.

Que a medida que hay más nacimientos probablemente tendremos más población y viceversa, que formarían un bucle positivo, un ciclo virtuoso.

Figura 17

Diagrama bucle causal

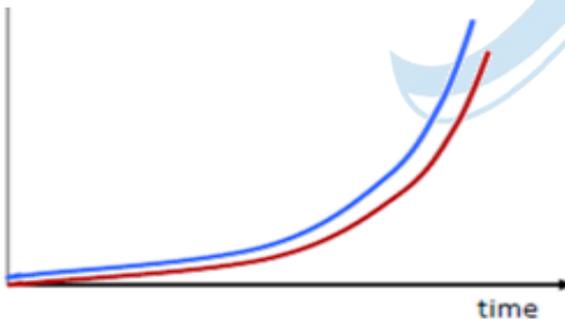


b. Gráfico del comportamiento

Este grafico representa la variación de las entidades a lo largo el tiempo. Responde algunas interrogantes ¿Cómo se comportan con el tiempo? ¿Qué tipo de comportamiento presentan? En el caso de nacimientos y la población su variación a lo largo el tiempo seria como la figura.

Figura 18

El comportamiento a lo largo del tiempo



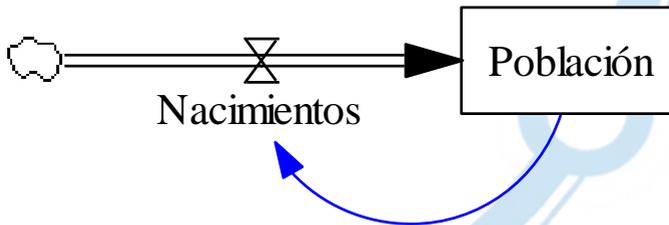
c. Diagramas de flujo y stock

Este diagrama se trata de ver la acumulación de variaciones en el tiempo. Un diagrama matemático formal que ayuda convertirlo en un modelo de simulación donde luego puedes jugar o manipular los parámetros.

El stock es donde guardan o acumulan los Nacimientos. Y los flujos se determinan en función de stock (el número de nacimientos).

Figura 19

Diagrama de Stock y Flujos



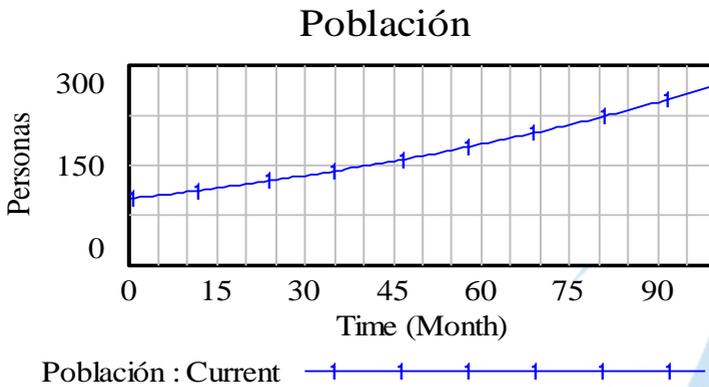
d. El Modelo de simulación

Un modelo virtual del comportamiento de objetos del mundo real. Modela el comportamiento del cierto aspecto de la

realidad en un periodo de tiempo. En la gráfica vemos una simulación virtual de comportamiento de nacimientos y la población en un periodo de tiempo.

Figura 20

Modelo de simulación



1.13. Proceso de modelado

El modelado tiene lugar en el contexto de la resolución de problemas del mundo real. En efecto, el propósito del modelado es resolver un problema, no solo obtener conocimientos (aunque se requiere un conocimiento profundo del problema para diseñar políticas más efectivas).

El modelo construido debe ayudar a los gerentes a diseñar sus organizaciones, diseñar las estrategias y tomar mejores decisiones. Los modelos deben tener el papel de ayudar a los gerentes a pilotear mejor sus organizaciones.

El modelo se desarrolla de manera integrado con la organización y un contexto social. Incluso antes de que comience el proceso de modelado per se, el modelador debe obtener acceso a la organización e identificar al cliente. Los *clientes* son los que buscan resolver un problema y actuar en el mundo real. El modelado debe ayudar a los clientes o usuarios a resolver su problema, no buscar el beneficio del modelador. Durante el proceso de modelado debe cambiar la opinión, las creencias de los clientes hacia un problema.

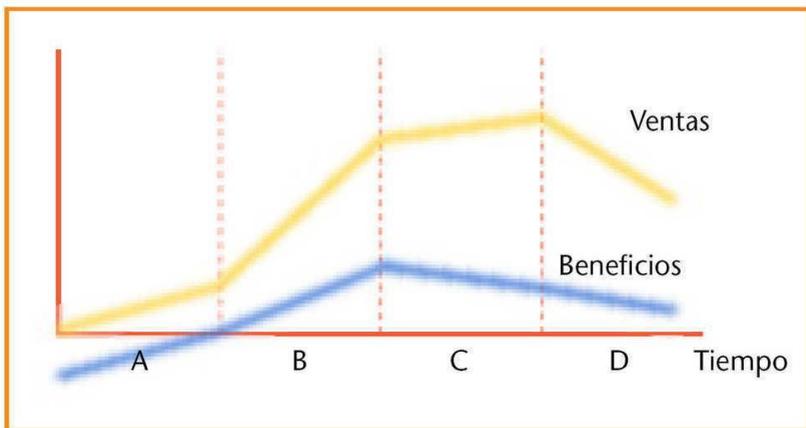
Para iniciar cualquier proceso de modelado es importante identificar los comportamientos problemáticos de los atributos del sistema. Para (Aracil, 1995) “El proceso de modelado consiste en el conjunto de operaciones mediante el cual, tras el oportuno estudio y análisis, se construye el modelo del aspecto de la realidad que nos resulta problemático”. Con el comportamiento problemático referimos al comportamiento inadecuado de los atributos del sistema, donde el analista bajo un paradigma de

sistemas considera un problema y pretende determinar cómo éste emerge de la estructura. Para comprender y resolver ese problema debe desarrollar un modelo continuando un proceso iterativo.

En la figura 21, observamos ejemplos de comportamientos problemáticos, que tanto las variables ventas y beneficios de una empresa después de un crecimiento exitoso tienen una tendencia de disminución, generando un malestar en los administradores.

Figura 21

Los comportamientos problemáticos

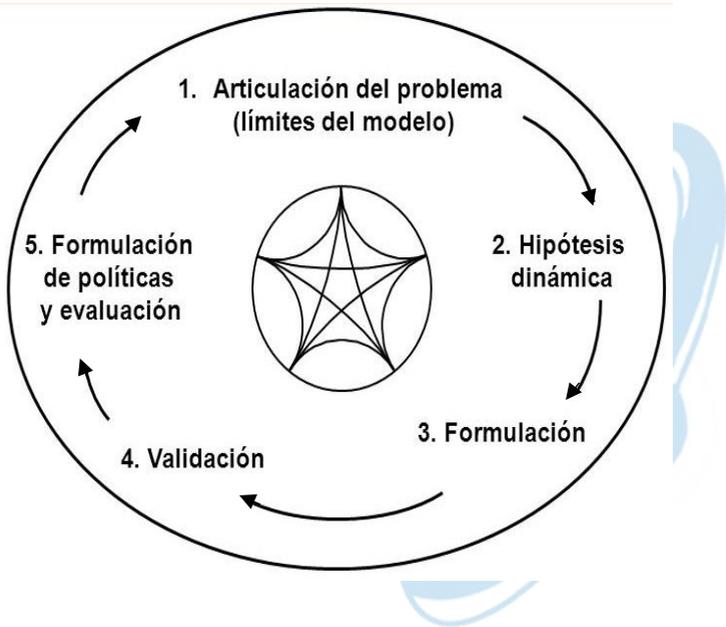


En este trabajo de investigación abordamos el caso de estudio bajo el proceso de modelado propuesto por (Serman, 2000). La metodología es fundamentalmente interdisciplinaria,

debido que su interés es el comportamiento de sistemas complejos, para su estudio continua un proceso de modelado iterativo que se basa en la teoría de la dinámica no lineal y el control de realimentación.

Figura 22

El proceso de modelado Sterman (2000)



a. Articulación del problema

Esta etapa consiste en la primera impresión de la situación problema o la realidad. Explica la situación problema a estudiar

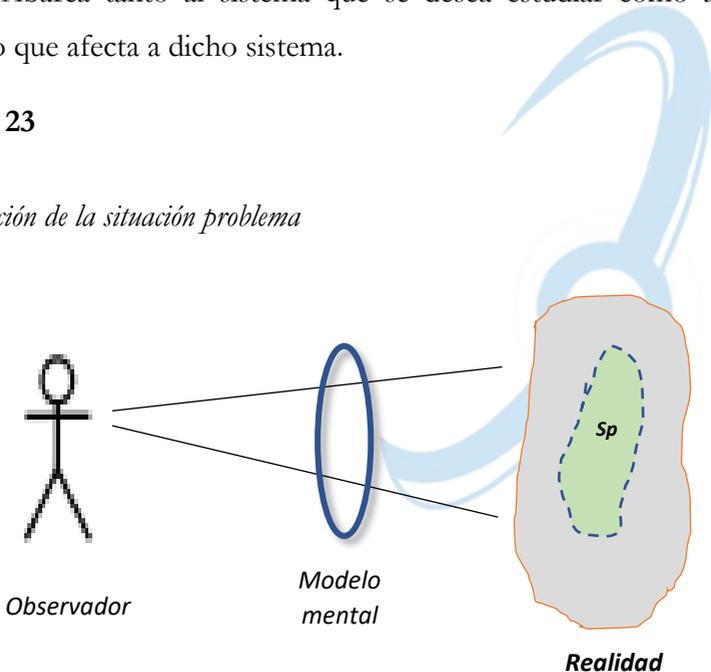
desde una perspectiva particular. Se debe observar los acontecimientos (pasado, presente y futuro) que suceden en aquella. Se empieza a delimitar el sistema y definir el entorno, aunque no se tenga una idea clara.

La situación problema, es aquella porción de la realidad social donde existe un conjunto de problemas, donde algo no está funcionando 'bien' y se necesita hacer algo para mejorar la situación del problema (Rodríguez Ulloa & Paucar Caceres, 2005).

Abarca tanto al sistema que se desea estudiar como al entorno que afecta a dicho sistema.

Figura 23

Observación de la situación problema



El paso más importante en el proceso de modelado es averiguar cuál es el problema real y quién es el cliente real. Aquí se determina las variables clave del problema y sus comportamientos problemáticos, así como, recoger los datos estadísticos. Etapa donde se debe definir claramente la situación problema y el propósito del modelo a construir.

b. Formulación de la hipótesis dinámica

En la segunda etapa del proceso de modelamiento se intenta desarrollar y proponer una teoría, llamada “la hipótesis dinámica”, que explique sobre por qué y cómo surgieron los comportamientos problemáticos en la situación problema. Aquí se utiliza la herramienta mencionada en el punto 3.4, el “diagrama de bucle causal”, un modelo de estructura causal, que representa las relaciones causales entre las variables.

Todos los diagramas de bucles causales se construyen a partir de tres elementos. Primero, los vínculos causales, que indican una relación de influencia positiva o negativa entre dos variables. Segundo, los bucles de realimentación formada por una cadena cerrada de vínculos causales que pueden formar una realimentación positiva o una realimentación negativa. Y tercer elemento las demoras, interrupciones en el flujo de influencia que

hacen que las consecuencias de los actos emerjan gradualmente. Para (Senge, 1998) “Casi todos los procesos de realimentación contienen alguna forma de demora. Pero a menudo las demoras no se identifican o no se comprenden”.

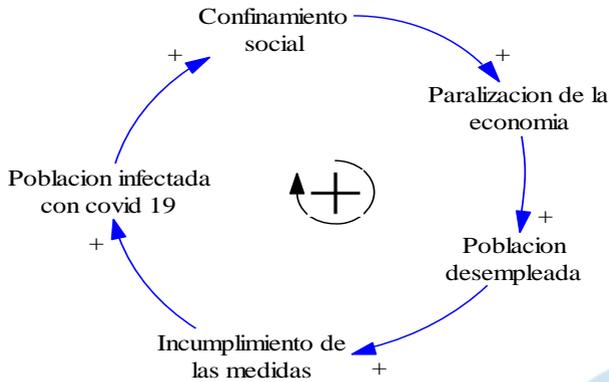
Bucle de realimentación positiva: o reforzador, por tener una conducta orientada al crecimiento o declive. Los movimientos ocurren en la misma dirección llevando a un círculo vicioso, donde las cosas empiezan mal y terminan peor.

Los movimientos también nos conducen a un círculo virtuoso, ciclos que se refuerzan en direcciones deseadas o esperadas. Por ejemplo, la figura 24 muestra cómo las acciones para reducir los casos de Covid 19 generan una conducta de crecimiento en la misma dirección, que manifiesta un círculo vicioso.

El confinamiento social genera la paralización de economía nacional. A medida que la economía permanece paralizada en el tiempo, provoca un aumento de la población desempleada, provocando a la población incumplir las medidas implementadas por el gobierno, provocando a la vez el aumento de comercio informal, generando el incremento de personas contagiadas por la COVID 19.

Figura 24

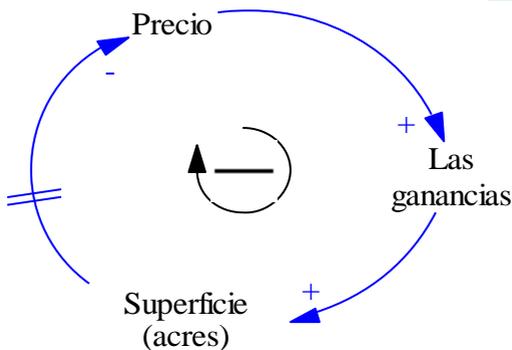
Bucle de realimentación positiva



Y bucle de realimentación negativa, o estabilizadora por tener una conducta orientada hacia las metas.

Figura 25

Bucle de realimentación negativa



c. Formulación del modelo de simulación

En esta etapa se desarrolla un modelo de simulación para probar la hipótesis dinámica construida en la etapa anterior. Es la etapa de transcripción de los modelos conceptuales a un modelo formal compuesto de ecuaciones no lineales.

Para simular los comportamientos del sistema se diseña el diagrama de flujo y stock, también conocida como el diagrama de Forrester en honor a Jay Forrester pionero de la dinámica de sistemas.

Este diagrama nos ayuda comprender mejor los comportamientos a lo largo del tiempo.

Figura 26

Diagrama de Stock y Flujos

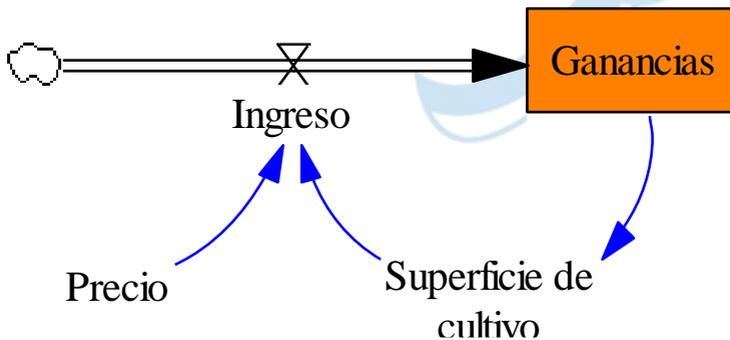
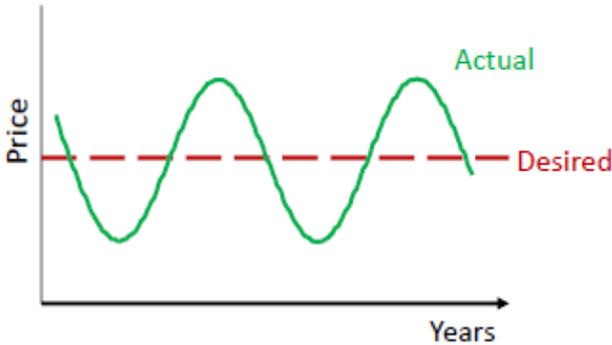


Figura 27

Modelo de simulación a lo largo del tiempo



Los **stocks** están representados por rectángulos (un recipiente que contiene el contenido del stock). Son acumuladores de eventos pasados, que cambian a través de flujos de entradas y salidas, como las ganancias cambian con mayores ingresos mensuales. El número de empleados en una empresa es otro ejemplo de los stocks.

Los **flujos** están representados por una tubería (flecha) que apunta hacia adentro (agregando) el stock o que apuntan hacia afuera (restando) del stock.

Estos son como válvulas, que controlan la tasa de cambio (tasas de ingresos, tasa de contratación, tasas de nacimiento, tasa de migración) del stock.

d. Probar el modelo de simulación

Etapa donde se realiza la validación del modelo dinámico. Por ejemplo, comparar si el comportamiento simulado del modelo se asemeja al comportamiento real del sistema.

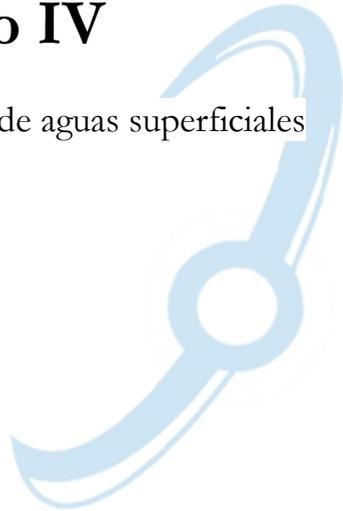
Se debe probar el modelo hasta que esté satisfecho de que es adecuado para su propósito. Algunas interrogantes que el modelador debería hacerse en esta etapa ¿El modelo reproduce el comportamiento problemático de manera adecuada para su propósito? ¿Es robusto en condiciones extremas? ¿Qué tan sensible es a las condiciones iniciales o cambios en los parámetros del modelo?

e. Diseñar y evaluar la política

Después de haber realizado las simulaciones y probado múltiples políticas, se puede determinar qué políticas se debe implementar. Aquí se diseña y se evalúa las políticas, no necesariamente seleccionar una política óptima.

Capítulo IV

Modelamiento de la gestión de aguas superficiales



En este capítulo se describe los resultados de la investigación realizada, en aplicación de la metodología de dinámica de sistemas en el modelamiento de la gestión de aguas superficiales, ya que la dinámica de sistemas, es una metodología del enfoque sistémico más empleada para la modelación de entornos complejos, y en recursos hídricos en particular. La misma que ha sido publicada en la Revista Geográfica de América Central de fecha 07 de abril del 2022¹.

Inicialmente se realiza una breve descripción del área de estudio y la situación problema que se aborda, como aquella porción de la realidad social donde existe un conjunto de problemas. Segundo lugar, se desarrolla el modelo de simulación basado el proceso de modelado de dinámica de sistemas descrito en el capítulo 3. Y finalmente, se realizó el análisis de las variables relevantes bajo los diferentes escenarios, concluyendo con los resultados y conclusiones.

4.1 Área de estudio

El caso de aplicación con el fin de discutir el uso del modelo dinámico, ha sido en el distrito de Pampas, capital de la

¹ <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/16038>

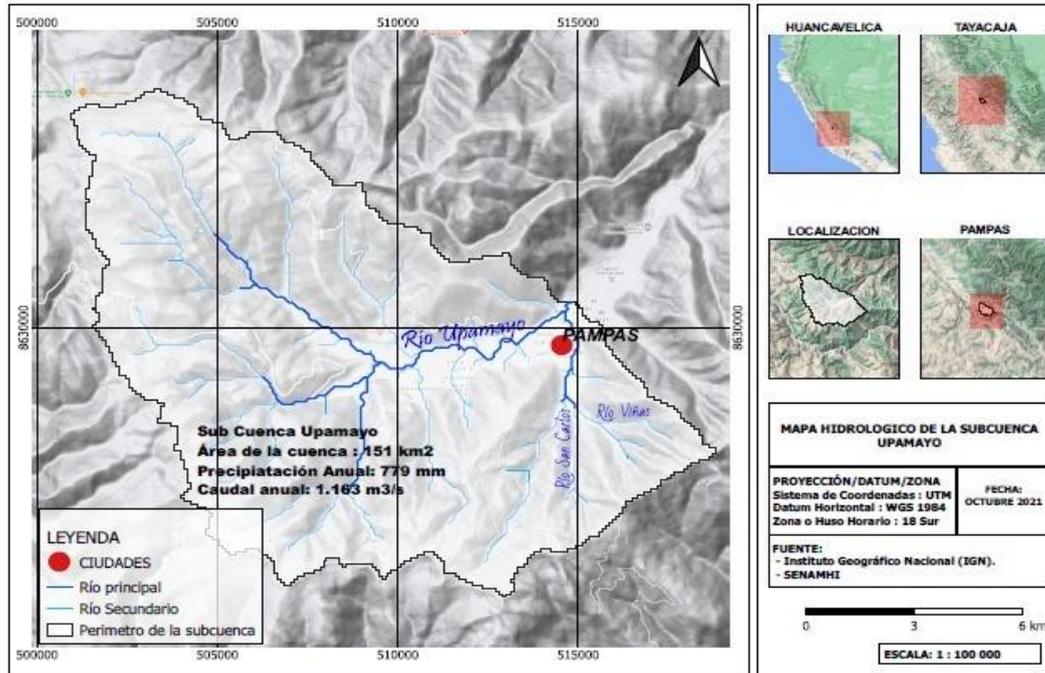
Provincia de Tayacaja de la región Huancavelica - Perú. El distrito presenta un sistema de drenaje compuesto por los ríos, manantiales, puquiales, quebradas y riachuelos que desembocan al río Mantaro. El río Upamayo perteneciente a la subcuenca Upamayo tiene una superficie 151.17 km² y es la fuente más importante que emplaza parcialmente en el distrito. Otras fuentes que emplazan 9.39 km² de superficie del distrito son: Samerino (13.85 km²) y Macas (16.89 km²), (SENAMHI, 2016). La población se abastece principalmente del líquido que procede de riachuelos Viñas y San Carlos que alcanzan aproximadamente un caudal de 40 litros/segundo en épocas del invierno (ver figura 1).

4.2 Situación problema

El abastecimiento de agua en el distrito de Pampas, depende del sistema de explotación de aguas superficiales, que integra el agua potable, alcantarillado y saneamiento; brindando los servicios a las actividades socioeconómicas que desarrollan la población en general. El sistema cuenta con una planta potabilizadora de capacidad de 400 m³ de agua. Sin embargo, no se cuenta con sistemas de tratamiento de aguas residuales, tampoco, de explotación de aguas subterráneas ni pluviales, a fin de atender la demanda que crece exponencialmente.

Figura 28

Mapa hidrológico de la subcuenca Upamayo. Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN) y Senamhi (2021)



Y como parte de la demanda de agua en aplicación de la ecuación (6), en el estudio se consideró el conjunto de actividades socioeconómicas de la siguiente manera:

- *En el sector doméstico*, el uso de agua es cada vez mayor, debido al crecimiento exponencial de la población que alcanza a 8120 habitantes con un nivel de consumo promedio 240 m³/año/hab., tomando como referencia la ciudad de Huancavelica donde el consumo asciende a 20 m³/mes, según Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS, 2013).
- *En el sector de servicios*, existen 35 instituciones privadas y públicas (educativas, salud, entre otros) que demandan el servicio de agua para desarrollar actividades socioeconómicas de la población. El coeficiente de consumo promedio de agua asciende a 1320 m³/año por institución (SUNASS, 2013).
- *En el sector de comercio*, la actividad comercial (restaurant, abarrotes y otros) ha crecido exponencialmente, como una fuente de sustento económico del 20% de la población, con un consumo de agua promedio que asciende a 480 m³/año (SUNASS, 2013).

- En el *sector agrícola*, el área cultivada alcanza aproximadamente 4 400,000 m², que demanda un recurso hídrico con un nivel de consumo 0.85 m³/año/m². Otros factores determinados fueron: la precipitación anual de 0.737 m³/año/m² y evapotranspiración potencial de 0.122 m³/año/m² (SENAMHI, 2016).
- Y en el *sector pecuario*, para fines de estudio se ha determinado 1200 principales ganados que demandan en mayor escala el líquido elemento, el consumo promedio es 26.64 m³/año por cabeza de ganado (Quevedo *et al.*, 2019).

4.3 Hipótesis dinámica

Con la información previamente obtenida, se formuló la hipótesis dinámica mediante el diagrama de bucle causal de la figura 29, que explica la estructura dinámica de la disponibilidad de aguas superficiales y la demanda de agua provocada por las actividades socioeconómicas, y cómo estos condicionan las tendencias de la escasez de agua.

El diagrama muestra los bucles de realimentación tanto positivas y negativas que forman la estructura del sistema bajo estudio, el primero tiende a generar un comportamiento de

crecimiento de las variables, mientras el segundo tiende a generar un comportamiento que busca un equilibrio.

El *bucle negativo* B1, explica cómo el aumento de las actividades socioeconómicas relacionadas al uso doméstico (domésticas, comerciales, institucionales), al uso pecuario y al uso agrícola de agua, provocan la mayor demanda del agua, generando su mayor escasez en el tiempo de estudio.

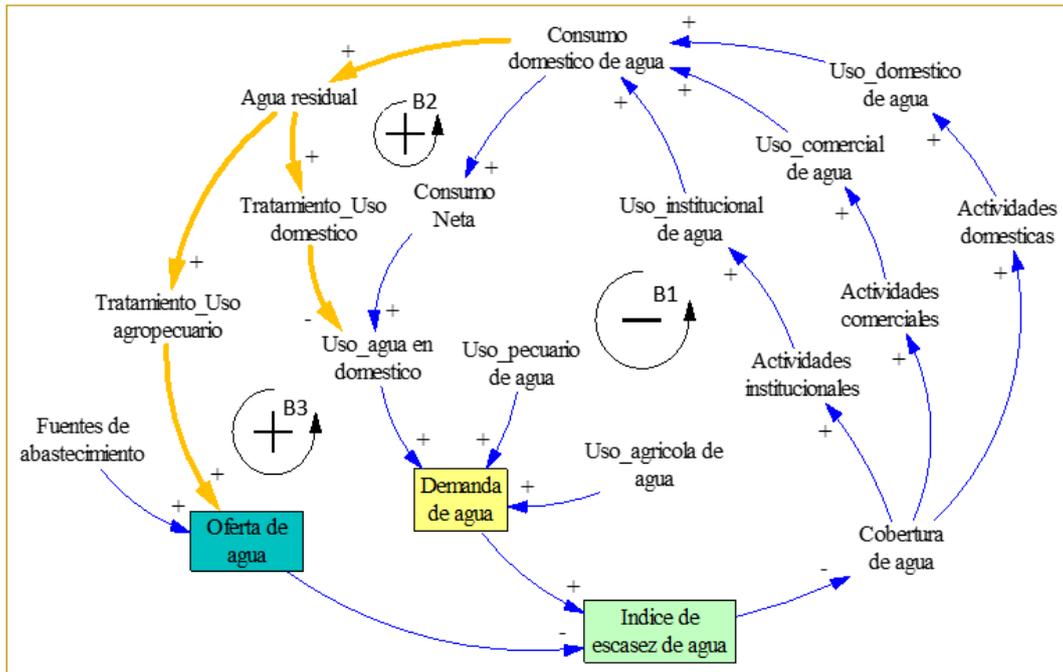
Este último afecta negativamente a la cobertura de agua, provocando cambios en las mismas variables socioeconómicas, donde se dio los cambios iniciales.

El *bucle positivo* B2, explica cómo una gestión adecuada de aguas residuales generada en las actividades socioeconómicas provocaría el aumento de la oferta de agua, que actualmente se encuentra condicionado por las fuentes de abastecimiento (los ríos, riachuelos, etc.), provocando disminución de la escasez del agua, y generando mayor cobertura en las variables socioeconómicas.

Y el bucle positivo B3, explica cómo la gestión adecuada de aguas residuales reduciría el nivel de la demanda y la escasez de agua, aumentando la cobertura en las variables socioeconómicas.

Figura 29

La hipótesis dinámica de la gestión de aguas superficiales. Gonzalo et al. (2004)



4.4 Modelo dinámico

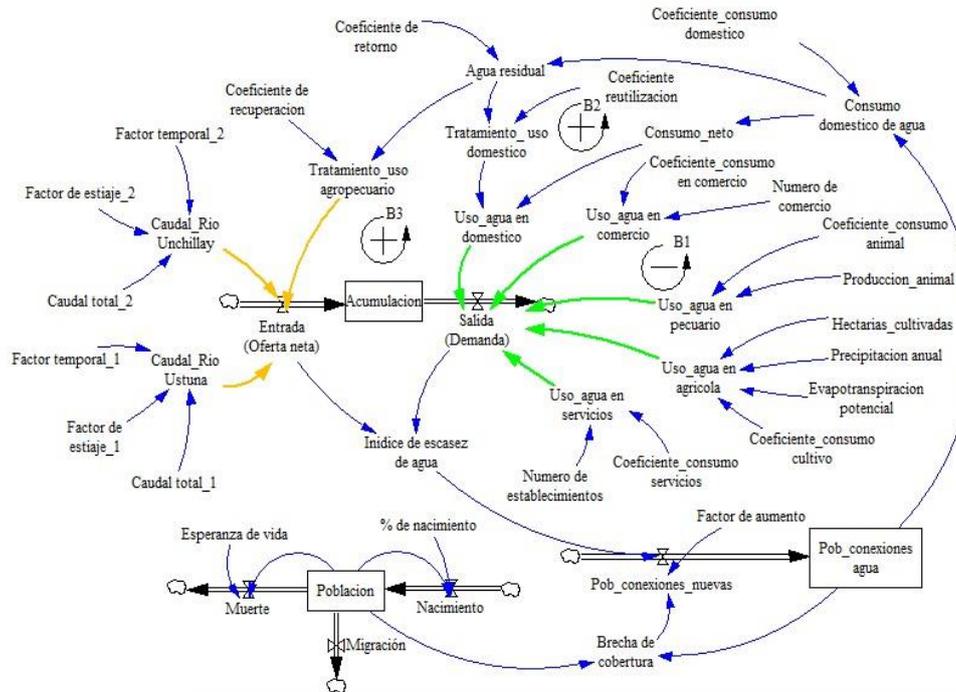
En la figura 30, presentamos el diagrama de stock y flujos de la gestión de aguas superficiales desarrollado en Vensim Ple Plus, un modelo formal compuesto por la interrelación de variables de tipo stock, flujos y auxiliares, que tienen un significado matemático.

El modelo dinámico permitió comprobar la hipótesis dinámica formulada en el diagrama de bucle causal, mediante la simulación de comportamientos de las variables claves del sistema.

De esa manera se comprendió mejor los comportamientos de las variables a lo largo del tiempo, realizar el análisis en diferentes escenarios y proponer mejoras de la situación problema. La tabla 3, muestra los valores de los parámetros utilizados en el modelo.

Figura 30

Modelo dinámico de gestión de la escasez de aguas superficiales. Gonzalo et al. (2004)



- **Sistema de variables**

El sistema de ecuaciones del modelo dinámico se basó de la Metodología de Gonzalo *et al.* (2004), considerando su naturaleza dinámica donde:

Índice de escasez: su cálculo se debe a la relación entre la oferta hídrica de aguas superficiales disponibles en las fuentes abastecedoras y la demanda de agua provocada por las actividades socioeconómicas:

$$I = \frac{D}{O_n} \times 100\% \quad (1)$$

Dónde: *I*: Índice de escasez %, *D*: Demanda total de agua m³, *O_n*: Oferta hídrica superficial neta m³.

La oferta hídrica superficial: La oferta de agua se refiere al volumen de agua almacenada en los cuerpos de aguas superficiales en un periodo determinado de tiempo. Para Costa *et al.* (2005) la oferta se clasifica en: oferta total que refleja el agua que discurre por las fuentes abastecedoras, y la oferta neta: define la cantidad de agua que ofrecen las fuentes luego de haber descontado la cantidad de agua que debe quedarse en ella para efectos de mantener el mínimo caudal durante el periodo de estiaje y para tomar en cuenta

los efectos adversos de la irregularidad temporal de oferta. Su cálculo se realiza a través la ecuación 2.

$$O_n = O_t \times (1 - R_e + R_{it}) \quad (2)$$

Donde: O_n : Oferta hídrica superficial neta m^3 , O_t : Oferta hídrica superficial total (m^3), R_e : es factor de reducción para mantener el régimen de estiaje, R_{it} : es factor de reducción por irregularidad temporal de la oferta hídrica. Cada una de las variables son expresadas de la siguiente manera:

- El volumen de oferta hídrica total (O_t) se obtiene como:

$$O_t = Q_o \times T \quad (3)$$

Dónde: Q_o considerado como caudal modal de las fuentes abastecedoras m^3/s y T cantidad de segundos en un año.

- El porcentaje de factor de reducción para mantener el régimen de estiaje (R_e), se construye en base a la función de densidad probabilística (FDP) de los caudales de estiaje Q_{min} . De esta función se extrae el caudal de estiaje con el 97.5% de probabilidad de excedencia $Q_{min\ 97,5\%}$ de modo que la reducción para mantener el régimen de estiaje de la fuente sería igual a la siguiente ecuación:

$$Re(\%) = \frac{Q_{min\ 97.5\%}}{Q_o} \times 100\% \quad (4)$$

- Para estimar el porcentaje del factor de reducción por irregularidad temporal (R_{it}) de la oferta hídrica se considera: C_v que representa los coeficientes de variación, C_s asimetría de los caudales promedio anuales y P el radio de correlación de los caudales diarios; expresada a través de una función como:

$$R_{it} = f(Q_o, C_v, C_s, \rho) \quad (5)$$

La estructura explícita de la función anterior es desconocida, por ello como primera aproximación para obtener el (R_{it}) se aplica la siguiente Coeficiente de variación por irregularidad temporal de la oferta hídrica

- Cuando C_v : (0 - 0,2) el R_{it} , (%) es 15
- Cuando C_v : (0,2 - 0,3) el R_{it} , (%) es 25
- Cuando C_v : (0,3 - 0,4) el R_{it} , (%) es 35
- Cuando C_v : (0,4 - 0,6) el R_{it} , (%) es 40
- Cuando C_v : (>0,6) el R_{it} , (%) es 50

Demanda hídrica: La demanda hídrica es determinada a través de los cálculos de volúmenes de consumo de agua por tipo de servicio. Este cálculo no contempla las pérdidas del agua en los sistemas de conducción, almacenamiento, tratamiento y distribución de agua en el suministro de agua potable, tampoco considera el nivel tecnológico, ni otros métodos de obtención del agua. Bajo estas consideraciones la demanda total de agua (D_t) está dada por la siguiente ecuación:

$$D_t = D_{ud} + D_{uc} + D_{us} + D_{ua} + D_{up} \quad (6)$$

Donde: D_{ud} : Demanda de agua para uso o consumo doméstico; D_{uc} : Demanda de agua para uso comercial; D_{us} : Demanda de agua para uso en servicios; D_{ua} : Demanda de agua para uso agrícola; D_{up} : Demanda para usos pecuarios.

Población: la población en general es un factor condicionante de la demanda de agua dado que con el crecimiento demográfico aumenta el consumo de agua en las actividades socioeconómicas. En consecuencia, la demanda del agua será mayor a lo largo del tiempo. La expresión matemática es:

$$\begin{aligned}
 Poblacion(t) = \int_0^n \left(\frac{dNacimiento}{dt} - \frac{dMuertes}{dt} \right) + \\
 poblacion(t_0) \qquad \qquad \qquad (7)
 \end{aligned}$$

Y la expresión de la población con acceso a las conexiones doméstico que dependen del índice de escasez de agua es:

$$\begin{aligned}
 Pob_conex\ agua(t) = \int_0^n \frac{d\left(\frac{Brecha\ de\ cobertura \cdot Factor\ aumento}{indice\ de\ escasez\ de\ agua}\right)}{dt} + \\
 pob_conex\ agua(t_0)
 \end{aligned}$$

Todas estas variables se encuentran interrelacionados formando bucles de realimentación en una unidad estructural de la cuenca hidrográfica, lo que determina su característica sistémica (ver figura 4).

- **Prueba del modelo**

Para demostrar la utilidad del modelo en la gestión de la escasez de aguas superficiales, éste fue sometido al análisis estructural y del comportamiento, aplicando los test de análisis de Sterman (2000). En los siguientes párrafos se resume las pruebas desarrolladas:

Primero, respecto a la aplicación de la Técnica de Análisis Estructural, el modelo fue sometido al *test de evaluación de la estructura*: Que consiste en comparar la estructura del modelo con

la estructura del sistema real que el modelo representa. Para ello, se realizó una revisión detallada de literaturas referidas a la gestión de los recursos hídricos como: UNESCO (2015), UNESCO (2019), GWP (2009) y Administración Nacional de Agua ANA (2013). Además, se realizó un análisis de la bibliografía relacionada al tema, desarrolladas por Martínez & Vargas (2016); Vilchis *et al.* (2018) y Martínez & Villalejo (2018), tomando en cuenta sus aportes y enfoques utilizados, que fueron relevantes para el desarrollo estructural del modelo. Adicionalmente, se examinó la literatura en el desarrollo de los modelos como Industrial Dynamics de J. Forrester y Business Dynamics de J. Sterman, ya que representan el origen y las bases teóricas en el desarrollo del modelo y la caracterización de las variables.

El *test de verificación de parámetros*; Que implica comparar los parámetros del modelo con la información disponible sobre el sistema real. En el modelo, los valores de los parámetros que condicionaron el comportamiento de las variables, tuvieron como fuente, el INEI proporcionando los indicadores demográficos del periodo 2010 al 2020. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (s.f.) proporcionó la información sobre el cálculo de los indicadores de la escasez del agua. El SENAMHI (2016) con la caracterización hidrológica proporcionó

la información respecto a la oferta y demanda hídrica existente en el distrito de Pampas. Y la SUNASS (2013) contribuyó con las informaciones referentes a la demanda de agua (*ver la tabla 1*).

Y el *Test de Consistencia Dimensional*; Que implica un análisis de las unidades de medida de las variables que conforman el modelo. La consistencia dimensional de ecuaciones del modelo fue revisada con la ayuda de software Vensim ple que cuenta con las herramientas: Check Model, función para comprobar la sintaxis del modelo, y Units Check, función para detectar errores en la coherencia de las unidades. Adicionalmente se realizó una inspección directa de las ecuaciones.

Segundo, la técnica de análisis del comportamiento, permitió corroborar el funcionamiento del modelo y el estado del sistema en el periodo de 2010 al 2020. El *Test de reproducción del comportamiento*, que implica comparar si el comportamiento del modelo presenta las mismas características estadísticas que el sistema real. El desempeño del modelo fue evaluado considerando el % de error generado entre los datos simulados y reales. Tomando como referencia el estudio de Barlas (1996) que establece “un modelo será válido si la tasa de error es más pequeña que el 5%” (p. 14).

Tabla 1
Valores de los parámetros del modelo

Parámetros	Unidades	Fuente de información	Valor
Coef_consumo domestico	m ³ /Year/hab	SUNASS (2013)	240
Coef_consumo comercio	m ³ /Year/hab	SUNASS (2013)	480
Coef_consumo animal	m ³ /Year/animal	Quevedo <i>et al.</i> (2019).	26.64
Coef_consumo cultivos	Dmnl	((CORDECRUZ), (PNUD), (FAO), 1989)	0.85
Coef_consumo servicios	m ³ /Year*servicio	SUNASS (2013)	1320
Coef_retorno	Dmnl	PTAR-Uniminuto	0.75
Evapotranspiracion potencial	m ³ /Year/m ²	SENAMHI (2016)	0.122
Precipitación anual	m ³ /Year/m ²	SENAMHI (2016)	0.737
Hectáreas cultivadas	m ²	PDC (2015)	440
Numero de comercio	Comercio	Determinación propia	400
No de establecimientos	Servicio	Determinación propia	35
Factor temporal	Dmnl	SENAMHI (2016)	0.15
Factor de estiaje	Dmnl	SENAMHI (2016)	0.17
Población	hab	INEI 2017, 2018, 2020	11,182
Tasa de nacimientos	hab	INEI 2017	0.021
Caudal total_1	l/s	Planta de tratamiento PTAP Pampas, 2019	229.43
Caudal total_2	l/s	Planta de tratamiento PTAP Pampas, 2019	229.43

La expresión matemática utilizada es:

$$\% \text{ error relativo} = \frac{\text{dato simulado} - \text{dato real}}{\text{dato real}} * 100$$

(9)

Considerando el acceso a la información histórica disponible en la zona de estudio, las variables sometidas a esta prueba fueron las variables: *la población*, *población con conexiones domésticas* y el *consumo de agua doméstica*.

Los resultados de análisis de comparación de medias obtenidas de la relación de datos simulados y datos reales, para *la población* obtuvo el % de error relativo de 2.5%, para *población con conexiones domésticas* se obtuvo 0.54% y para el nivel *de consumo de agua doméstica* se obtuvo 0.60%.

Estos resultados presentaron tasa de error aproximadas con variación mínima, menores del 5%.

Tabla 2

Resumen de comparación de datos simulados y datos reales

	Población	Población de conexiones de agua	Consumo de agua en domestico
Datos Estadístico			
Media	11,157	7,102	1,685,326.95
Desviación estándar	238	81	15,895.41
Mínimo	10,572	7,000	1,650,000
Máximo	11,403	7,230	1,706,190
Nivel de confianza (95%)	160	54	10,678.68
Datos Simulados			
Media	11,436	7,064	1,695,514.25
Desviación estándar	158	43	10,396.25
Mínimo	11,182	7,000	1,680,000
Máximo	11,706	7,129	1,711,118.87
Nivel de confianza (95%)	106	29	6,984.29
Error relativo de datos	2,5%	0,54%	0,60%

Fuente: SPSS v23

DINÁMICA DE SISTEMAS:

MODELAMIENTO DE GESTIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES

El *Test de análisis de sensibilidad*, que implica centrar la atención en la sensibilidad del modelo ante los cambios del valor de los parámetros dentro el rango plausible de incertidumbre. Para comprobar se realizaron simulaciones de Monte Carlo con ayuda de software Vensim en un rango de incertidumbre de 50% (-50%, 100%, +50%) sobre el valor estimado de parámetros inciertos determinados como:

Tabla 3

Valores de los parámetros inciertos

Parámetros	Rango de incertidumbre		
	-50%	100%	+50%
Tasa de nacimiento	0.010	0.021	0.03
Coefficiente de retorno	0.375	0.75	1.125
Coefficiente_consumo domestico	120	240	360
Coefficiente_consumo comercio	240	480	720
Coefficiente_consumo servicio	606	1212	1818
Factor temporal_1	0.075	0.15	0.225
Factor de estiaje_1	0.085	0.17	0.255
Factor temeporal_2	0.075	0.15	0.225
Factor de estiaje_2	0.085	0.17	0.255

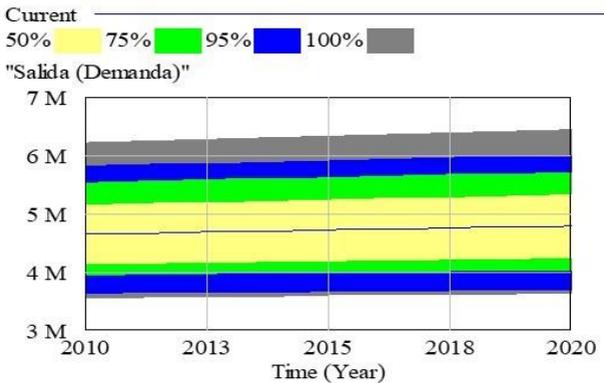
Fuente: elaboración propia

Las figuras 31, 32 y 33 muestran el resultado de las simulaciones de modos de comportamiento y los límites de confianza dinámicos del 50%, 75%, 95% y 100% de las variables

relevantes en una muestra de 200 simulaciones, asumiendo que la distribución de valores es uniforme. Bajo estos supuestos, existe un 50% de probabilidad de que la *demanda de agua* alcance los valores aproximados entre 4.5 y 5.3 millones de m³ de agua en el periodo del 2010 a 2020, y en 95% de probabilidad que alcance los valores entre 3.8 y 6.0 millones de m³ de agua. Quiere decir que la variable es muy sensible ante los cambios de los parámetros inciertos, permitiendo que la variable tenga mayor grado de confianza.

Figura 31

Resultado del análisis de Sensibilidad de la demanda de agua.

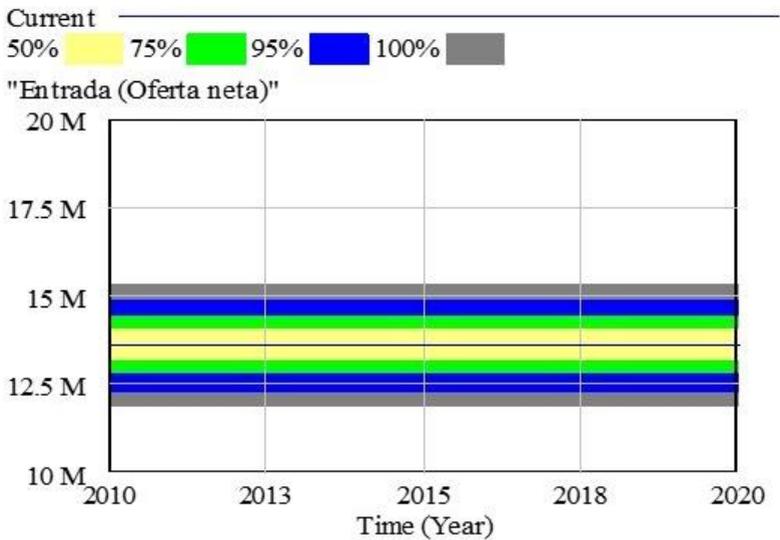


Asimismo, el comportamiento de la variable *oferta neta* es menos sensible, presentando la estabilidad durante el periodo de

evaluación, debido a que algunos parámetros no tienen influencia alguna sobre esta variable. Existe un 100% de probabilidad de que la oferta neta alcance los valores aproximados entre 12.2 y 15.1 millones de m³ de agua.

Figura 32

Resultado del análisis de Sensibilidad de la oferta neta de agua

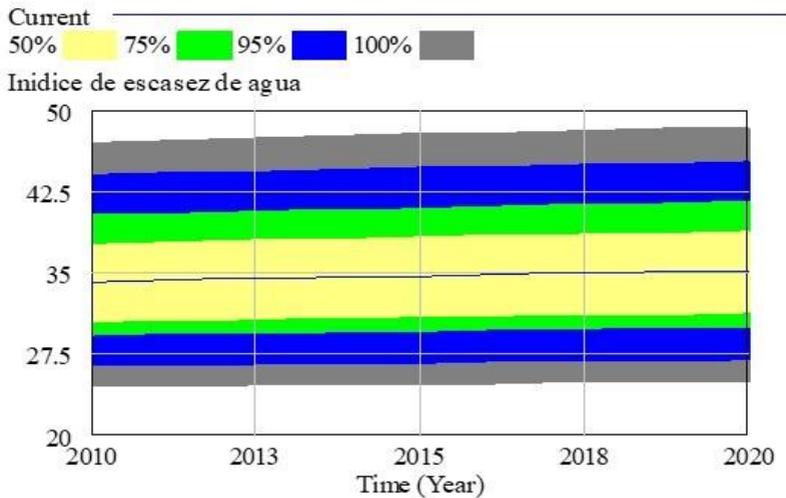


Y finalmente, en el mismo supuesto caso, existe un 50% de probabilidad de que el *índice de escasez de agua* alcance los valores aproximados entre 31 y 38%, y en 95% de probabilidad que alcance los valores entre 25 y 44%.

La variable *índice de escasez de agua* es muy sensible durante el periodo de análisis ante los cambios de parámetros inciertos.

Figura 33

Resultado del análisis de Sensibilidad del índice de escasez de agua



Las pruebas aplicadas indican, que la estructura del modelo desarrollado, es coherente sintácticamente y dimensionalmente. Las variables reproducen comportamientos plausibles que aproximan a los datos estadísticos; y a su vez, tras el análisis de sensibilidad se confirma los límites de confianza dinámicos de las variables frente los parámetros inciertos establecidos.

Se afirma que el modelo dinámico presenta un nivel de confiabilidad aceptable respondiendo positivamente los propósitos del desarrollo, y ser empleado para el análisis de las políticas de mejora establecidas en la gestión de la escasez de aguas superficiales.

4.5 Resultados

A fin de utilizar el modelo para el analizar la gestión de la escasez de aguas superficiales, se tomó las políticas establecidas por Qadir *et al.*, (2007) que las aguas residuales, son “un subproducto de procesos específicos o pueden ser el resultado de tecnología especializada para recolectar al agua. Recursos que necesitan un tratamiento adecuado previo al uso” (p. 2-22).

Y para Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR (2014) el Coeficiente de Retorno (R) oscila entre 70 y 80%, que es el porcentaje del total de agua consumida que se devuelve al alcantarillado, las mismas que pueden ser reutilizadas.

Estas políticas fueron analizadas en la figura 30, donde se percibe los resultados de simulación de la *demanda* de agua, *oferta neta* y el *índice de escasez de agua*, en tres situaciones y cada una en tres escenarios en un periodo de 2010 al 2040 (*ver siguientes figuras*)

- ***Situación 1: el aumento poblacional y políticas de tratamiento: reutilización de aguas residuales***

En un *escenario actual* donde no existe políticas de tratamiento para reutilizar el agua residual, la demanda de agua presenta un comportamiento lineal, en consecuencia, el índice de escasez de agua alcanza el 37% al año 2040, quiere decir que el agua demandada alcanzaría el 37% del agua disponible, este hecho alerta una situación de escasez “medio”. Requiriendo medidas urgentes para mejorar la eficiencia en su utilización del agua y optimización de la oferta disponible.

Y en un *escenario de aumento poblacional* al 8% del valor actual desde el año 2021, el comportamiento de la demanda es exponencial y el índice de escasez de agua alcanzaría 41%, alertando una situación escasez “alto”.

En esta situación el agua se convierte en un factor limitador del desarrollo de actividades socioeconómica, y requiere una atención máxima de la oferta disponible.

Sin embargo, en un *escenario de tratamiento* para reutilizar el 30% de aguas residuales desde el año 2021, la demanda y el índice de escasez de agua presentarían una tendencia menor para el año

2040 que, en otros escenarios, reduciendo el índice de escasez del agua de situación Alta (41%) a una situación Medio (36%).

Esta diferencia de 5% nos lleva a inferir, que la implementación de políticas de reutilización de aguas residuales para disponer a uso doméstico, permitiría reducir el agua demandada generando un ahorro de agua doméstica hasta 540,289 m³.

Figura 34

Resultado de la demanda de agua. El aumento poblacional y políticas de tratamiento: reutilización de aguas residuales

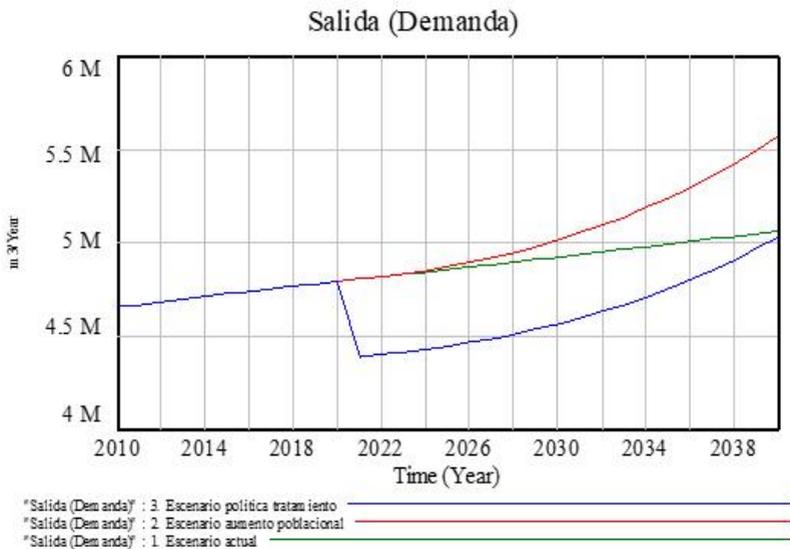
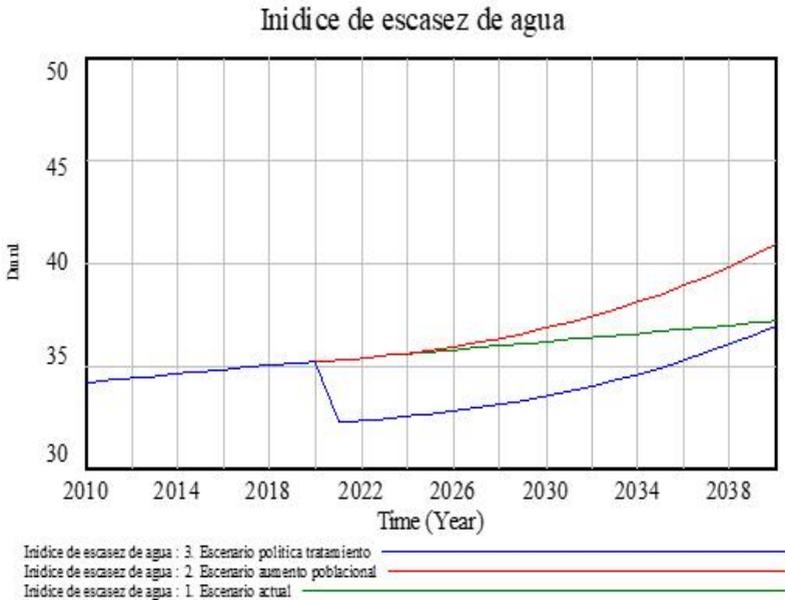


Figura 35

Resultado del índice de escasez de agua. El aumento poblacional y políticas de tratamiento: reutilización de aguas residuales



• ***Situación 2: el aumento poblacional y políticas de tratamiento: recuperación de aguas residuales***

En el *escenario actual* donde no existe políticas de tratamiento para recuperar el agua residual, la oferta de agua muestra un comportamiento constante, en consecuencia, el índice de escasez de agua presenta una tendencia lineal al año 2040.

Donde el agua demandada alcanzaría el 37% del agua disponible, alertando una situación de escasez “*medio*”. Y en un *escenario de aumento poblacional* al 8% del valor actual desde el año 2021, el índice de escasez de agua alcanzaría el 41% para el año 2040, alertando una situación de escasez “*alto*”.

Sin embargo, en un escenario de políticas de tratamiento para recuperar hasta el 50% de aguas residuales, la oferta de agua presenta una tendencia mayor al año 2040 en comparación del escenario actual; y el índice de escasez muestra un comportamiento menor que el escenario de aumento poblacional, reduciendo el índice de escasez de situación Alta (41%) a una situación Medio (38%).

Esta diferencia de 3% se debe, que la implementación de políticas de recuperación de aguas residuales para disponer a uso agropecuario, permitiría incrementar la oferta del agua hasta 1 006,113 m³.

Figura 36

Resultado de la oferta de agua. El aumento de la población y políticas de tratamiento: recuperación de aguas residuales



Figura 37

Resultado del índice de escasez de agua. El aumento de la población y políticas de tratamiento: recuperación de aguas residuales



- ***Situación 3: el aumento poblacional y políticas de tratamiento: reutilización y recuperación de aguas residuales***

En un *escenario actual*, el índice de *escasez de agua* presenta una tendencia creciente alcanzando aproximadamente el 37% para el año 2040.

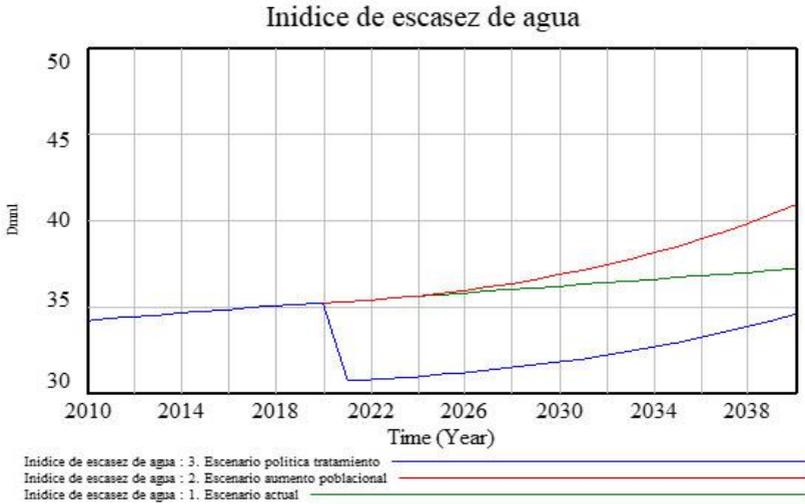
Y en un *escenario de aumento poblacional* al 8% del valor actual desde el año 2021, el índice de escasez de agua alcanzaría el 41% alertando una situación de escasez “*alto*” para el año 2040. Sin embargo, en un escenario de políticas de tratamiento para reutilización de agua residual (30%) y recuperación (50%), el comportamiento del índice de escasez de agua presenta una tendencia menor que en otros escenarios, disminuyendo la situación Alta (41%) a una situación Medio (34%).

Esta diferencia del 7% se debe, a que la implementación de estas políticas de tratamiento reduciría la demanda de agua.

Y permitiría incrementar la oferta del agua, lo que hace que el índice de escasez sea menor.

Figura 38

Resultado de índice de escasez de agua. El aumento de la población y políticas de tratamiento: reutilización y recuperación de aguas residuales



Finalmente, en las figuras anteriores se explica la situación actual de la escasez del agua en el distrito de Pampas y sus tendencias para el año 2040. Donde en un escenario de aumento de la población, el *índice de escasez* se ubica en una situación “alto”, sin embargo, con las políticas de tratamiento de aguas residuales, la situación de escasez se reduce a una situación “medio”. Esto se debe, a medida que se realiza los tratamientos de aguas residuales, la población dispone de una fuente adicional para cubrir sus

requerimientos domésticos y agropecuarios, por lo que la demanda disminuye, y el índice de escasez del agua presenta una tendencia decreciente.

4.6 **Discusión de resultados**

Los resultados evidencian la utilidad del modelo dinámico como una herramienta de gestión que ayuda a visualizar el resultado de las decisiones en la gestión de la escasez de aguas superficiales, alertando la situación de escasez del agua a través del indicador del índice de escasez, que distingue los umbrales críticos (baja, moderado, medio y alta). La utilidad que es coherente a las metas establecidas en la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible CEPAL (2016) que incluye como pilar fundamental la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos GIRH, con el objetivo de asegurar el abastecimiento del agua dulce frente al crecimiento de la escasez del agua provocada por el crecimiento demográfico y cambio climático.

Asimismo, en el modelo, las políticas frente las aguas residuales procedentes de actividades socioeconómicas, presentan efectos positivos en el comportamiento de la escasez del agua, como; a mayor reúso de aguas residuales, disminuye la demanda del agua doméstica, y a la vez aumenta la disponibilidad del agua;

en consecuencia, el comportamiento del índice de la escasez del agua presenta una tendencia baja. Estas políticas son coherentes con los establecidos por ANA (2013), que el tratamiento de aguas residuales consiste en aumentar la calidad de las aguas, así como, la disponibilidad de recursos hídricos, que pueden ser dispuestos para atender la demanda del recurso en otras actividades. De igual manera para UNESCO (2019) la disponibilidad reducida de agua per cápita requiere de políticas como la “reutilización del agua, que ofrece oportunidades para fortalecer el abastecimiento convencional de agua, especialmente en ciudades que dependen de fuentes de agua más distantes” (p. 52), además, puede ser dispuesto para otras actividades como para la irrigación de cultivos.

CONCLUSIONES

Se concluye que la gestión de la escasez de aguas superficiales observado desde un enfoque de los sistemas dinámicos, permite a comprender su estructura compleja, ayudando a diseñar políticas más eficaces mediante escenarios de simulación. Por tanto, el modelo propuesto muestra su utilidad en la comprensión de la complejidad de la gestión del agua y como una herramienta para la toma de decisiones respecto a su escasez. Dado que, las estrategias de tratamiento de aguas residuales evaluadas con el modelo desarrollado, permitirá prevenir y reducir la situación de la escasez de agua al año 2040.

Se sugiere que las instituciones involucradas en la gestión de los recursos hídricos, deben considerar la metodología del cálculo de índice de la escasez de aguas superficiales y el enfoque de sistemas dinámicos, cuando implementen estrategias en la gestión de la escasez de los recursos hídricos y las cuencas hidrográficas, para enfrentar una oferta que cada vez disminuye frente a una demanda creciente de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Autoridad Nacional de Agua. (ANA, 2013). *Plan Nacional de Recursos*.
Ministerio de Agricultura y Riego, Lima, Ciudad de Lima.

Aracil, J. (1995). *Dinamica de Sistemas*. Madrid: Gráficas Marte.

Aracil, J., & Gordillo, F. (1998). *Dinamica de sistemas*. Madrid: Anzos
S.L.

Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation
in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 14.

Comision Economica para America Latina y Caribe. (CEPAL,
2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
Santiago.

Checkland, P., & Scholes, J. (1994). *La metodologí.a de sistemas suaves
en accron*. Mexico: Grupo Noriega Editores.

CORDECruz, Cooperación de Desarrollo de Santa Cruz;
PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el
Desarrollo; FAO, La Organización de las Naciones Unidas
para la Alimentación y la Agricultura. (1989). *Balance hidrico
y necesidades de agua para los cultivos mas importantes en la cuenca
del rio La Cienega Vallegrande, Santa Cruz, Bolivia*. Santa Cruz.

- Costa Posada, C., Gonzalo Rivera, H., Domínguez Calle, E. A., & Vanegas Sarmiento, R. (2005). El Índice de escasez de agua ¿Un indicador de crisis o una alerta para orientar la gestión del recurso hídrico? *Revista Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes*, 104-111.
- Domínguez Calle, E. A., Gonzalo Rivera, H., & Vanegas Sarmiento, R. (2008). Relaciones Demanda-Oferta De Agua y El Índice de Escasez de Agua Como Herramientas de Evaluación del Recurso Hídrico Colombiano. *Revista Academia Colombia Ciencias*, 196-212.
- Fernández Vargas, G. (2020). La gobernanza del agua como marco integrador para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible en Latinoamérica. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 7.
- Gonzalo Rivera, H., Marin Ramirez, R., Domínguez Calle, E. A., & Vanegas Sarmiento, R. (2004). *Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial*. Lima: OTAN-INEI.
- Global Water Partnership. (GWP, 2009). *Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas*. Londres.

Hernández Pasichana, S. M., & Posada Arrubla, A. (2018). Avances de la Investigación Sobre la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 553-563. doi:<https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1079>.

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (INEI, 2017). *Compendio estadístico 2017*. Huancavelica

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (INEI, 25 de junio de 2018). *Población del Perú*. Obtenido de <https://www.inei.gob.pe/prensa/noticias/poblacion-del-peru-totalizo-31-millones-237-mil-385-personas-al-2017-10817/#:~:text=Seg%C3%BAn%20los%20primeros%20resultados%20de,mil%20370%20mujeres%20m%C3%A1s%20que>

Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Mazatlán. (JUMAPAM, 15 de Marzo de 2021). *Distribución de Agua en el Planeta*. Obtenido de <http://jumapam.gob.mx/cultura-del-agua/distribucion-de-agua-en-el-planeta/>

Laclette, J., & Zúñiga, P. (2012). *Diagnóstico del agua en las américas*. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC, Mexico.

- Martínez Austria, P., & Vargas Hidalgo, A. (2016). Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(4), 153.
- Martínez Valdés, Y., & Villalejo García, V. M. (2018). La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 61.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (MINAGRI, 2015). *Plan Nacional de Recursos Hídricos*. Lima, Lima.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (MINAGRI, 2010). *Reglamento de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos*. Lima, Lima.
- Moreira, A., Mirandola, P. H., Luiz, A., Salinas, E., & Oliveira, I. (2020). Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. *Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 72. doi:<https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.76232>
- Municipalidad Provincial de Tayacaja. (2015). *Plan de Desarrollo Concertado Tayacaja 2015-2021*. Pampas.
- Municipalidad Provincial de Tayacaja. (2019). *Planta de tratamiento de agua potable 2019*. Pampas.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (UNESCO, 2015). *Afrontar los retos estudios de casos e indicadores*. París, Francia: ONU.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (UNESCO, 2019). *No Dejar a Nadie Atrás. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019*. Francia: Lucart Estudio S.A. de C.V.

Organización de Naciones Unidas. (ONU, 17 de junio de 2019). *Naciones Unidas*. Obtenido de Población mundial: <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-2019.html>

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. (PTAR, 2014). *Beneficios de Planta El Salitre*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/ptaruniminuto/home>

Qadir, M., Sharma , B., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R., & Karajeh, F. (2007). RNon-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agricultural Water Management*, 87(1), 2-22. doi:doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.018

- Quevedo, W., Quevedo, W., Ortiz, L., Sardán, S., Rivera, E., & García, D. (2019). Disponibilidad y consumo de agua para la ganadería bovina en el municipio de Mojocoya. *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación*, 17(20), 133-142.
- Rodriguez Ulloa, R., & Paucar Caceres, A. (2005). Soft System Dynamics Methodology (SSDM): A Combination Of Soft Systems Methodology (SSM) And System Dynamics (SD). *Systemic Practice and Action Research*, 37.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (SENAMHI, 2016). *Caracterización Hidrológica del distrito de Pampas y San-tiago de Tucuma – Departamento Huancavelica*. Lima, Perú: Minis-terio del Ambiente
- Senge, P. (1998). *La Quinta Disciplina*. Mexico: Granica.
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Massachusetts: McGniw-Hill Higher Education.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (SUNASS, 2013). *Determinación de la fórmula tarifaria, estructura tarifaria y metas de gestión aplicable a la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Huancavelica*

S.A.C. Municipalidad Provincial de Huancavelica,
Huancavelica, Huancavelica.

Vilchis Mata, I., Garrocho Rangel, C. F., & Díaz Delgado, C.
(2018). Modelo dinámico adaptativo para la toma de
decisiones sostenibles en el ciclo hidrosocial urbano en
México. *Revista Geografía Norte Grande*(71), 59-90.
doi:[http://dx.doi.org/10.4067/S0718-
34022018000300059](http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022018000300059)

Von Bertalanffy, L. (1968). *Teoría General de los Sistemas*. Mexico.

