

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS  
ECONÓMICAS ADMINISTRATIVAS Y CONTABLES**

**Maestría en Ciencias Económicas  
Mención en Gestión Pública**



*TESIS*

**Modelo de simulación para predecir el abastecimiento de agua  
potable en la ciudad de Andahuaylas, al 2050**

Para optar el grado de maestro en Ciencias Económicas:  
Mención en Gestión Pública

PRESENTADO POR:

BACH. JAVIER PORTILLO QUISPE

ASESOR: Dr. HERMES S. BERMUDEZ VALQUI

AYACUCHO – PERU  
2019

## **DEDICATORIA**

A mi hijo Aarón Javier y a mi esposa Maritza.

El presente trabajo, está dedicado a mis padres Roberto y Sebastiana.

A mis hermanos, quienes me motivan siempre a conseguir mis metas.

A mis sobrinos, tíos, cuñados, abuelos y amigos en general, porque me brindaron su cariño, apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

A mi compañero de estudios de Posgrado Jhon Henry Pahuara Quincho en el cielo.

A las personas que luchan por sus sueños y por un mundo mejor.

## **AGRADECIMIENTO**

Al Dr. Hermes Segundo Bermúdez Valqui, mi asesor de tesis y a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este trabajo de investigación.

A los docentes de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Al Ing. Nilo Dueñas Espinoza, Gerente General de EMSAP Chanka, ya que sin su apoyo no se hubiera concretado el presente trabajo de investigación.

## CONTENIDO

DEDICATORIA	01
AGRADECIMIENTO	02
CONTENIDO	03
RESUMEN	07
ABSTRACT	08
INTRODUCCIÓN	09

## CAPÍTULO I

<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b>	11
<b>1. Planteamiento del problema</b>	11
1.1 Enunciado del Problema	11
1.2 Formulación del Problema	17
1.2.1 Problema principal	17
1.2.2 Problemas específicos	17
1.3 Delimitación del Problema	17
1.3.1 Delimitación Espacial	17
1.3.2 Delimitación Temporal	17
1.3.3 Delimitación Cuantitativa	17
<b>2. Objetivos</b>	18
2.1 Objetivo Principal	18
2.2 Objetivos Secundarios	18
<b>3. Importancia y Justificación</b>	19
3.1 Importancia	19
3.2 Justificación	20

<b>4. Hipótesis</b>	
4.1 Hipótesis Principal	21
4.2 Hipótesis Secundarias	21
<b>5. Marco teórico de referencia</b>	22
5.1 Antecedentes	22
5.2 Bases teóricas	26
5.2.1 Dinámica de Sistemas	26
5.2.2 Abastecimiento del agua potable	41
5.2.3 Producción de agua potable	51
5.2.4 Demanda del agua potable	55
5.2.5 Teoría general de sistemas	56
5.2.6 Enfoque sistémico	57
5.2.7 Pensamiento sistémico	57
5.2.8 Simulación	58

## **CAPÍTULO II**

<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	73
2.1 Tipo de investigación	73
2.2 Nivel de investigación	73
2.3 Instrumentos y Técnicas	74
2.3.1 Instrumentos	74
2.3.2 Técnicas	74
2.4 Diseño	79
2.5 Fuentes de información	79

## CAPÍTULO III

<b>RESULTADOS</b>	80
3.1 Enfoque sistémico	80
3.1.1 Componentes del Sistema	80
3.1.2 Objetivo del sistema	80
3.1.3 Gráfico del modelo del sistema de agua potable	80
3.2 Diagrama causal	82
3.2.1 Lista de variables endógenas	82
3.2.2 Lista de variables exógenas	84
3.2.3 Lista de variables incluidas	84
3.2.4 Lista de variables excluidas endógenas	85
3.2.5 Lista de variables excluidas exógenas	86
3.2.6 Variables incluidas definidos conceptualmente	86
3.2.7 Gráfico del diagrama causal	88
3.2.8 Lazos de realimentación identificados	90
3.3 Diagrama de Forrester	92
3.3.1 Lista de variables de flujo	92
3.3.2 Lista de variables de nivel	93
3.3.3 Lista de variables auxiliares	93
3.3.4 Variables relacionados	93
3.3.5 Variables asignados con sus valores	93
3.3.6 Gráfico del diagrama de Forrester	93
3.4 Validación de la estructura del modelo	95
3.4.1 Coherencias de las unidades de las variables comprobadas	95
3.4.2 Ecuaciones del modelo	95
3.4.3 Tablas de validación del modelo	97
3.5 Simulación del modelo	98
3.5.1 Gráficos y tablas del modelo	98
3.5.2 Proyecciones a partir de la simulación del modelo	104

3.6 Escenarios propuestos	105
3.6.1 Escenario 1	105
3.6.2 Escenario 2	106

#### **CAPÍTULO IV**

<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	107
--------------------------------	-----

#### **CAPÍTULO V**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	117
5.1 Conclusiones	117
5.2 Recomendaciones	120
<b>REFERENCIA BIBLIOGRAFICA</b>	121
<b>ANEXOS</b>	125

## **RESUMEN**

La gestión hídrica de los sistemas urbanos está compuesta de muy diversos elementos que interactúan entre sí, que exhiben ciclos de retroalimentación y conductas emergentes, de tal manera que no pueden emplearse modelos simples, en resumen, se trata de sistemas complejos. En estas condiciones, los tomadores de decisiones requieren de métodos y herramientas apropiadas, que les permitan examinar diversas alternativas y sus impactos en el tiempo. El enfoque de sistemas y la modelación con dinámica de sistemas son uno de los campos de investigación más activos y prometedores en la gestión de los recursos hídricos. En este trabajo se propone desarrollar un modelo de simulación para predecir el abastecimiento del agua potable para la ciudad de Andahuaylas al 2050; mediante la dinámica de sistemas, la teoría general de sistemas, un software de simulación, con el propósito de satisfacer la demanda de usuarios del agua potable, con la finalidad de contar con un modelo de simulación para predecir el abastecimiento del agua potable. Se han examinado dos escenarios: un escenario cuando la captación de agua potable se reduce en 20% por el cambio climático y un escenario en la que la tasa de natalidad se reduce de 2% a 1.5%, a fin de evaluar la sustentabilidad de la oferta de agua disponible en la ciudad de Andahuaylas. El modelo desarrollado, permitió aumentar la comprensión, a cerca de la forma de funcionamiento del sistema de recursos hídricos del municipio, esto lo convierte en un valioso instrumento computacional de auxilio a los formuladores de políticas para el planeamiento de los recursos hídricos en la zona de estudio.

**Palabras clave: Dinámica de Sistemas, Modelo, Simulación, Agua potable.**

## **ABSTRACT**

The water management of urban systems is composed of very diverse elements that interact with each other, which exhibit feedback cycles and emerging behaviors, so that simple models can not be used, in short, complex systems. Under these conditions, decision makers require appropriate methods and tools that allow them to examine various alternatives and their impacts over time. The systems approach and modeling with systems dynamics are one of the most active and promising fields of research in water resources management. In this work, it is proposed to develop a simulation model to predict the supply of drinking water for the city of Andahuaylas by 2050; through system dynamics, general systems theory, simulation software, with the purpose of satisfying the demand of drinking water users, in order to have a simulation model to predict the supply of drinking water. Two scenarios have been examined: a scenario when the uptake of drinking water is reduced by 20% due to climate change and a scenario in which the birth rate is reduced from 2% to 1.5%, in order to assess the sustainability of the water supply available in the city of Andahuaylas. The model developed, allowed to increase the understanding, about the way of functioning of the water resources system of the municipality, this makes it a valuable computational tool to help the policy makers for the planning of water resources in the area of study.

**Keywords: System Dynamics, Model, Simulation, Drinking water.**

## INTRODUCCIÓN

Forrester (1961), señala que la Dinámica de Sistemas (DS) es una nueva metodología utilizada en el estudio de los sistemas complejos. Su fundador, el profesor e ingeniero electrónico Jay Wright Forrester del Massachusetts Institute of Technology (MIT), propuso en 1956 un método, basado en la simulación, para el análisis global de problemas empresariales relacionados con la gestión de la producción y el inventario, que en un principio recibió el nombre de “dinámica industrial”, sus resultados quedaron reflejados en el famoso libro Dinámica Industrial.

La dinámica de sistemas es una metodología para la representación simbólica de sistemas complejos mediante la definición matemática de variables y de sus relaciones. En los últimos 50 años la dinámica de sistemas se ha consolidado como una metodología aplicada a campos tan diversos como la economía, ecología, política, sociología y gestión de recursos. Su aplicación al campo de los recursos hídricos ha crecido de forma notable durante las últimas dos décadas. Algunas de las características de esta metodología son su flexibilidad lo cual ha permitido su aplicación a campos de muy diversa índole, su transparencia y la capacidad para integrar información tanto cuantitativa como cualitativa.

Los modelos permiten simular el impacto de diferentes políticas relativas a la situación a estudiar ejecutando simulaciones what if (¿qué pasaría si?) que permiten ver las consecuencias a corto, mediano y largo plazo, y ser de gran ayuda en la comprensión de cómo los cambios en un sistema lo afectan en el tiempo. En este sentido es muy similar al pensamiento sistémico ya que se basa en los diagramas causales con bucles o lazos de retroalimentación (feedback). Estos modelos de simulación permiten además hacer

simulaciones para estudiar el comportamiento de los sistemas y el impacto de políticas alternativas.

El agua es esencial para la vida, ningún ser vivo conocido puede sobrevivir sin ella. Desde los albores de la humanidad, el agua ha jugado un papel fundamental en el desarrollo y la organización de las sociedades. La complejidad real de la gestión de los recursos hídricos ha requerido la creación de modelos de mayor flexibilidad y alcance, que sean capaces de integrar conocimientos de múltiples disciplinas para representar la variedad de fenómenos relacionados con la gestión del agua.

A través de un análisis sistémico de los recursos hídricos de la ciudad de Andahuaylas, se determinaron las principales variables y sus respectivas interrelaciones, conformándose así, la estructura del modelo de producción y demanda de agua potable. Esta estructura se presenta en el diagrama causal, que sirve como base para la elaboración del diagrama de estoque y flujos o llamado también diagrama de Forrester, por medio de la cual se establece el modelo matemático que permite efectuar la simulación numérica.

Los resultados obtenidos permitieron constatar que el modelo está estructurado y se comporta de forma coherente a los datos existentes en la realidad, lo que torna adecuado para la simulación. El modelo ha sido desarrollado con el software de simulación Vensim, se escogió como horizonte de planeación un periodo de 38 años (2013-2050).

# **CAPITULO I**

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

### **1. Planteamiento del problema**

#### **1.1. Enunciado del problema**

Debido al crecimiento poblacional y a los problemas de variabilidad climática, surgen con mayor intensidad los conflictos de carácter socio ambiental por la competencia de los recursos naturales. El agua dulce es un recurso clave en estos conflictos entre las partes interesadas a nivel local, regional e incluso internacional. Hoy estos conflictos han tomado muchas formas, pero casi siempre surgen del hecho que las cuencas hidrográficas del mundo no coinciden con las fronteras políticas, y el agua no se distribuye uniformemente en el espacio y tiempo. Naturalmente, los conflictos sobre el agua se dan entre dos o más partes y cada una de ellas pueden tener múltiples objetivos relacionados con una serie de incertidumbres.

Según la ONU (2015), el agua enfrenta una crisis severa mundial, la cual está lejos de ser resuelta, el problema fundamental es que la cantidad disponible se encuentra fija, mientras que la población aumenta cada año geométricamente, la cantidad de agua que hay en nuestro planeta es de 1,386 millones de km<sup>3</sup> de la cual solo el 2.5% es dulce y de éste únicamente el 30.5% puede ser utilizado por el hombre, ya que el otro 69.5% se encuentra en los glaciares, en forma de hielo y otros, por tanto únicamente hay 10.5 millones de km<sup>3</sup> disponibles para su aprovechamiento. Mil 600 millones de personas viven en escasez absoluta, mientras que 663 millones viven sin un suministro

cercano, si el desperdicio y la contaminación del agua continúan, para el 2025, mil 800 millones de personas vivirán en zonas de escasez de agua.

Es imposible reubicar a las personas con excedente de agua como es Canadá, por lo cual se calcula que para el 2050 el 60% de la población mundial viva con menos de 1,000 m<sup>3</sup> de agua por año, siendo las zonas más afectadas África, Medio Oriente y Europa del Este.

Según el Snapshot of the World's Water Quality (2016), a pesar que de que Latinoamérica cuenta con alrededor del 31 por ciento de los fuentes de agua potable en el mundo, podría ser una de las regiones más afectadas en una eventual crisis provocada por cambio climático, América Latina y el Caribe cuentan con la cobertura más alta de agua potable de las regiones en desarrollo (94 por ciento). Sin embargo, los índices de cobertura varían ampliamente entre países y entre las zonas rurales y urbanas de un mismo país.

Aproximadamente 37 millones de personas carecen de acceso a agua potable, y casi 110 millones no tienen acceso a saneamiento. Los países con el menor acceso al agua potable de América Latina son: Haití, República Dominicana, Nicaragua, Ecuador, Perú y Bolivia. Desde los años noventa la contaminación de los ríos ha empeorado en América Latina, África y Asia. De esta forma, mientras en los países desarrollados la calidad del agua mejora con el paso de los años, la contaminación de ríos empeora en países en desarrollo.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), ubica al Perú a nivel mundial en el puesto 17, en relación con la cantidad de agua disponible por persona y el Banco Mundial en el puesto 14 en acceso al agua a nivel de América Latina.

Según datos del Ministerio del Ambiente el Perú cuenta con 106 cuencas hidrográficas por las que escurren 2'046,287 millones de metros cúbicos al año (MMC). Así mismo, cuenta con 12,200 lagunas en la sierra y más de 1,007 ríos. Sin embargo, por acción de la naturaleza, la distribución de los recursos hídricos es muy desigual.

El cambio climático ha ocasionado el incremento de la temperatura que trae como consecuencia un gran impacto en el abastecimiento del agua potable, especialmente en la región costera del Perú. Claro ejemplo de esto es lo que sucede en el nevado Pastoruri. El país tiene el 77% de los glaciales tropicales del mundo, cuyas aguas en su mayoría recorren la franja costera para el provecho de la agricultura y la población que se asienta en dicha región. El 86% del agua dulce en el país es consumido por la agricultura y la ganadería. De los 53 ríos de la costa, 16 ya se encuentran contaminados por los relaves mineros y los vertederos poblacionales. Uno de los ríos que se verá más afectado por el calentamiento global de la Tierra será el Mantaro, que deriva del nevado Huaytapallana y de la Laguna Junín, donde se origina el glaciar. La importancia de este río es que sus aguas alimentan la Central Hidroeléctrica del Mantaro, que representa aproximadamente el 40 por ciento de la energía del país. La disminución del líquido elemento en el Mantaro sería devastador para el Perú, pero sobre todo para el 70 por ciento de la industria nacional concentrada en Lima.

Según el Programa de Adaptación al Cambio Climático - PACC (2012), en los últimos 10 años se ha identificado en total 27 conflictos por el agua en el espacio regional de Apurímac. Como uno de los primeros resultados de su análisis, se elaboró una tipología de seis tipos de conflictos que cubren el espectro de la

casuística que se presenta en las regiones andinas de Apurímac: i) acceso y distribución del agua entre comunidades campesinas; ii) acceso y distribución del agua entre uso poblacional y agrario; iii) intervención de actores institucionales externos; iv) contaminación con aguas servidas de uso urbano; v) trasvase y acceso territorial al agua; vi) intervención de actores empresariales.

Las inadecuadas políticas hídricas y las estrategias institucionales provenientes del nivel central han configurado una problemática de la gestión del agua que ha generado y agudizado conflictos en torno al agua. Una situación de desencuentro entre los usuarios y actores de la gestión social del agua y de la gestión pública y empresarial del agua. Los conflictos identificados más frecuentes y arraigados son los que ocurren entre las empresas mineras y las comunidades de su entorno. Los conflictos en torno al agua no solo se deben a la escasez, por lo tanto el cambio climático por sí solo no podrá explicar los conflictos. El cambio climático tenderá a exacerbar o agudizar los conflictos por el agua preexistentes; o también pondrá en evidencia problemas de gestión del agua pre-existentes que no aún se han convertido en conflictos.

Según la DIRESA Apurímac (2016), en los próximos 20 años al menos 35 mil habitantes de la región Apurímac consumirían agua no apta para el consumo humano, ocasionando enfermedades gastrointestinales y de otros tipos.

Este grave problema afectaría a las comunidades más pobres de las provincias de la región, incrementa el riesgo de que los niños presenten Enfermedades Diarreicas Agudas (Edas), perjudicando su salud y desarrollo.

Según los resultados del Censo 2017 de INEI, la ciudad de Andahuaylas albergaba aproximadamente 80,789 habitantes en el año 2017, distribuido de la

siguiente manera: Andahuaylas, Talavera y San Jerónimo con una tasa anual de crecimiento de 2%, proyectándose una población de 128,825 habitantes para el año 2050, en el año 1993 contaba con una población de 38,918. En los últimos años, la ciudad de Andahuaylas sufrió un crecimiento vertiginoso de su población de forma desorganizada, siendo esta una de las principales razones para que una gran parte de la población aún no cuente con servicios de agua potable y alcantarillado, la cobertura del servicio de agua potable está a cargo de la empresa prestadora de servicios de agua potable EMSAP Chanka.

Según la SUNASA (2017), la ciudad de Andahuaylas tiene como fuente de abastecimiento de agua provenientes del manantial de Wassipara ubicado en el distrito de San Jerónimo con un caudal de 42 lt/s, manantial de Tonlyncco Huaycco ubicado en el distrito de Andahuaylas con un caudal de 2 lt/s y el manantial de plaza de armas de Andahuaylas con 5.5 lt/s. Estas fuentes subterráneas tienen una capacidad limitada de producción de agua, con la tendencia a la disminución de su cantidad y calidad, debido a situaciones ambientales y urbanas, tanto locales como globales, que afectan cada día más la producción de tan preciado recurso, tales como la contaminación de ríos, tierras y el por desarrollos de poblaciones rurales y ampliación de las fronteras agrícolas, deforestación, cambio climático entre otras. La población urbana y rural (niños adultos, y agricultores), carecen de conciencia sobre los efectos a largo plazo de su comportamiento, sus acciones y toma de decisiones están basadas en una visión de corto plazo, básicamente debido a la pura necesidad de supervivencia y a un muy pobre nivel de educación.

El agua es esencial para el mantenimiento de la vida y puede convertirse en el principal problema local en el corto o mediano plazo, la desigual distribución del recurso, aunado a la contaminación del mismo por parte del mal uso de productos fertilizantes, industriales, el cambio climático; en especial la ciudad de Andahuaylas no escapa a este problema, aunado al rápido crecimiento de la población.

En el futuro, la mayor parte de la población se asentará en zonas urbanas, en las que la presión sobre el recurso hídrico ya es muy grande. Ante esta situación, las empresas operadoras de agua y saneamiento deben realizar un esfuerzo continuo de planeación, que haga eficaz la aplicación de los reducidos recursos naturales y económicos. Sin embargo, la gestión hídrica de los sistemas urbanos está compuesta de muy diversos elementos que interactúan entre sí, que exhiben ciclos de retroalimentación y conductas emergentes, de tal manera que no pueden emplearse modelos simples. En resumen, se trata de sistemas complejos. En estas condiciones, los tomadores de decisiones requieren de métodos y herramientas apropiadas, que les permitan examinar diversas alternativas y sus impactos en el tiempo. El enfoque de sistemas y la modelación con dinámica de sistemas son uno de los campos de investigación más activos y prometedores en la gestión de los recursos hídricos. En estas condiciones, los tomadores de decisiones requieren de métodos y herramientas apropiadas, que les permitan examinar diversas alternativas y sus impactos en el tiempo.

Por lo expuesto, es necesario desarrollar un modelo de simulación para predecir el abastecimiento del agua potable para la ciudad de Andahuaylas 2013-2050; mediante la dinámica de sistemas, la teoría general de sistemas, el software de

simulación Vensim, con el propósito de satisfacer la demanda de usuarios del agua potable, con la finalidad de contar con un modelo para predecir el abastecimiento del agua potable al 2050.

## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema principal**

¿En qué medida un modelo de simulación predice el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Andahuaylas, al 2050?.

### **1.2.2 Problemas específicos**

- a. ¿Cómo el modelo cualitativo del diagrama causal apoyará en la predicción del abastecimiento del agua potable en la ciudad de Andahuaylas?.
- b. ¿En que medida el modelo cuantitativo del diagrama de Forrester insidirá en la predicción del abastecimiento del agua potable en la ciudad de Andahuaylas ?.

## **1.3 Delimitación del problema**

### **1.3.1 Delimitación espacial**

La investigación se realizará en los tres distritos metropolitanos de la provincia de Andahuaylas: Andahuaylas, San Jerónimo y Talavera con una área de territorio urbano aproximadamente de 251.83 Km<sup>2</sup>.

### **1.3.2 Delimitación temporal**

La investigación se realizará con la información histórica del año 2013 al 2017 para validar el modelo y la proyección al 2050.

### **1.3.3 Delimitación cuantitativa**

La investigación tomará como referencia a la población de los tres distritos metropolitanos de la provincia de Andahuaylas: Andahuaylas, San Jerónimo y Talavera; contando con una población de 80,789; la misma que servirá para las proyecciones en el modelo de simulación.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo Principal**

Desarrollar un modelo de simulación para predecir el abastecimiento del agua potable para la ciudad de Andahuaylas al 2050; mediante la dinámica de sistemas, la teoría general de sistemas, un software de simulación, con el propósito de satisfacer la demanda de usuarios del agua potable, con la finalidad de contar con un modelo de simulación para predecir el abastecimiento del agua potable.

### **2.2 Objetivos secundarios**

- a. Elaborar el diagrama causal para predecir el abastecimiento del agua potable, identificando las variables relevantes y analizando los lazos de realimentación, con la finalidad de tener el modelo cualitativo del sistema.
- b. Construir el diagrama de Forrester para pronosticar el abastecimiento del agua potable con la finalidad de tener el modelo cuantitativo del sistema y tener los pronósticos de la producción y demanda de agua potable al 2050.

### **3. Importancia y Justificación**

#### **3.1 Importancia**

La necesidad de tomar decisiones asociadas a sistemas complejos con múltiples efectos de realimentación, que incluyen respuestas no lineales, y demoras estructurales que retrasan el impacto a las medidas adoptadas, requiere la utilización efectiva de herramientas cuantitativas. Los métodos y modelos de dinámica de sistemas desarrollados por Jay W. Forrester, son adecuados para tratar este tipo de problemas, ya que permiten representar y evaluar la complejidad dinámica del sistema de agua potable con el fin de diseñar políticas, planear cambios estructurales en sistemas y procesos. La simulación en dinámica de sistemas permite realizar experimentos sobre un modelo en lugar de hacerlo con un sistema real; es decir permite observar los efectos que la adopción de una nueva política tendrá sobre el sistema real.

Algunas de las ventajas que esta metodología ofrece frente a la experimentación sobre el sistema real son las siguientes:

- a. Su bajo costo, puesto únicamente se requiere invertir en la elaboración del modelo mientras que la adopción de cualquier medida en el sistema real implicaría la inversión de fuertes sumas.
- b. La simulación mediante un modelo supone un ahorro de tiempo, puesto que, una vez elaborado el modelo, la simulación de una posible política o situación se efectúa en un momento. Por el contrario, la adopción de decisiones en el sistema real requiere mayor inversión en tiempo para su discusión y puesta en práctica y sus efectos se manifestarán en el largo plazo.

- c. La eliminación del riesgo de adopción de políticas inadecuadas, las repercusiones de la adopción de una política inadecuada afectarán a todo el sistema y sus efectos negativos perdurarán en el largo plazo.

### **3.2 Justificación**

La aplicación de esta herramienta permite una mejor comprensión del sistema objeto de análisis y del problema de partida al permitir la obtención de una visión global del mismo, facilitando el planteamiento de medidas alternativas en el sistema de agua potable de la ciudad de Andahuaylas.

## **4. Hipótesis**

### **4.1 Hipótesis Principal**

El modelo de simulación permite predecir el abastecimiento del agua potable en la ciudad de Andahuaylas al 2050. Asimismo nos permite facilidades a través de la modelación y simulación el entendimiento y comportamiento de las diferentes variables del sistema de agua potable bajo diversos escenarios; por lo que contribuirá en la gestión integral del agua potable.

### **4.2 Hipótesis Secundarias**

a) El Diagrama causal nos permite elaborar el modelo cualitativo del sistema para apoyar en la predicción del abastecimiento del agua potable en la ciudad de Andahuaylas.

b) El Diagrama de Forrester nos permite elaborar el modelo cuantitativo del sistema a partir de la cual se obtendrá los pronósticos de la producción y demanda de agua potable al 2050 para la ciudad de Andahuaylas.

## **5. Marco teórico de referencia**

### **5.1 Antecedentes**

Zabala (2011), en su tesis titulada “Análisis de estrategias de desarrollo sostenible a nivel de una cuenca hidrográfica: aplicación de la dinámica de sistemas al caso de la cuenca del río Yumbo”, concluye que en los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas en el Valle del Cauca” se percibe la carencia de una visión integrada de los sistemas y la proyección en el tiempo de las situaciones problemáticas que no garantizan la sostenibilidad, para lo cual la dinámica de sistemas, como se pudo ver en el trabajo desarrollado, aporta en la comprensión de las interconexiones entre subsistemas de la cuenca y la definición de escenarios de acuerdo a las estrategias implementadas. En los resultados del modelo de simulación se pueden ver las fuertes interconexiones que existen entre los sistemas económico, social y ambiental; la economía de la zona alta basada en el autoconsumo depende fuertemente de la rentabilidad de los cultivos sembrados ahí y de su dotación de agua; la economía de la zona baja al igual que en la zona urbana depende de los empleos generados en la zona que no alcanzan a ser suficientes para que los ingresos reales de los hogares crezcan y el desempleo baje, así mismo el conflicto de uso del suelo está fuertemente ligado a la creciente extinción del pasto natural promovido por actividades de pastoreo.

Martínez (2016) en su tesis titulada “Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano”, concluye que los sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento son sistemas complejos, es decir, que están compuestos de múltiples variables interconectadas mediante una estructura subyacente, y que exhiben retroalimentación y conductas emergentes; en consecuencia, para resolver la

problemática que su naturaleza dinámica les impone, deben usarse técnicas de modelación que representen de modo adecuado al sistema y su cambio en el tiempo, bajo diferentes escenarios de variación natural y estrategias de intervención. La modelación de sistemas dinámicos adaptivos es una metodología útil para la creación de modelos de simulación que permitan el diseño de escenarios, compuestos por diversas estrategias, y la valoración de sus resultados en el sistema; en última instancia, se muestra como una valiosa herramienta para los tomadores de decisiones del sistema; en este texto, las ventajas de la modelación dinámica de sistemas se aplicaron al caso de la ciudad de Puebla y área conurbada, que atiende el Sistema de aguas de la ciudad; se analizó el posible efecto del escenario tendencial, y se diseñó y probó un escenario de balance, compuesto por un conjunto de estrategias, que demostró la posibilidad de revertir la condición actual de déficit y de conducir al sistema a un balance. El periodo de análisis termina en 2030.

Rubio (2016), en su tesis titulada “Desarrollo y aplicación de un modelo de dinámica de sistemas para la gestión integral del sistema Júcar”, concluye que tras realizar un estudio de los fundamentos teóricos de la dinámica de sistemas y seguir el desarrollo de esta metodología a lo largo de la historia (haciendo especial hincapié en su aplicación para la gestión de recursos hídricos), se ha presentado el modelo del sistema Júcar creado mediante el programa de software Vensim; este modelo del sistema Júcar, el primero creado para la zona mediante esta metodología, simula la gestión del agua a lo largo del tiempo de forma similar a como lo hace el modelo validado para la misma zona creado en SIMGES; la diferencia entre ambos modelos es que nuestro modelo Vensim es únicamente un modelo de simulación cuyo interés reside en que permite la definición explícita de reglas de operación para los embalses y

que dispone de una flexibilidad mayor para la introducción de nuevos elementos y dinámicas en la simulación; la posibilidad de definir las reglas de operación de los embalses explícitamente mediante operadores lógicos permite reproducir mejor la toma de decisiones que siguen los gestores reales de los embalses, así mismo, permite poner a prueba estas reglas de operación y evita el relativo oscurantismo que puede haber detrás de un modelo de recursos hídricos cuyas sueltas de los embalses vienen determinadas por un algoritmo de optimización.

Veroíza (2009), en su tesis titulada “Modelamiento del suministro de agua para satisfacer la demanda a costos optimizados”, concluye que con los resultados parciales se puede decir que los modelos están logrando reproducir lo que es la producción de agua potable (Oferta de agua potable) en la planta San Luis de Talca, correspondiente a la empresa Aguas Nuevo Sur S.A; al tener estos modelos, ya se pueden realizar estimaciones de que nivel de producción se necesita para satisfacer la demanda, manteniéndose dentro de los márgenes de seguridad; con esto se puede verificar si las curvas de producción menos costosas son capaces de satisfacer la demanda sin correr ningún peligro en que se produzca algún desabastecimiento por falta de agua potable almacenada en los pozos de la planta; este tipo de modelo es bien flexible ya que permite cambiar ciertos parámetros y modificar los resultados; como por ejemplo modificar el consumo KW/h el cual siempre está variando; y así no tener problemas en determinar los costos de operación basados en la curva de producción.

Zambrana (2009), en su tesis titulada “Modelo de simulación del equilibrio hídrico: una aplicación de la dinámica de sistemas en el análisis y toma de decisiones sobre el volumen de agua no contabilizada en Sela – Oruro”, concluye que las principales causas

de pérdidas que influyen sobre el volumen de agua no contabilizada son: los errores de asignación que causaron una pérdida del 11,73%, los errores de medición que establecieron un 6,95% y las fugas no visibles causantes de la pérdida del 7,09%, del total del agua producida; la empresa destina casi toda la producción al sistema de distribución, el equilibrio entre la disponibilidad del recurso y la demanda es muy delicado, poniendo de manifiesto la riesgosa situación del abastecimiento de agua potable en la ciudad; se pudo evidenciar que actualmente la empresa no es eficiente en el control de las pérdidas ya que se pudo estimar que el índice de agua no contabilizada representa una pérdida del 39,2% del agua producida; se pudo resaltar a través del trabajo de investigación, todas las bondades y potencialidades que ofrece la Dinámica de Sistemas, como mecanismo de análisis y de apoyo a la toma de decisiones en una empresa.

Domínguez y Moreno (2008), en su trabajo de investigación titulada “Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico Colombiano”, concluye que Las relaciones demanda-oferta de agua para los sectores socioeconómicos de Colombia constituyen un indicador del estado del recurso hídrico en el país, su expresión mediante el índice de escasez de agua permite vislumbrar un panorama en el que las magnitudes de demanda y de oferta máximas no coinciden en el espacio, ocasionando conflicto y altos niveles de presión sobre el recurso hídrico, esta situación, que refleja un uso inapropiado del territorio, es el resultado de una planeación con mecanismos inapropiados de asignación del agua, que en muchos casos, gracias a la ausencia de sistemas de seguimiento del estado del recurso hídrico amplifica la presión sobre el recurso hídrico dada la ausencia de elementos técnicos para la toma de decisiones en

sectores de alta demanda hídrica, la solución ante tal contexto consiste en el fortalecimiento de la gestión integral del recurso hídrico, especialmente en las estrategias no sólo de protección de la oferta hídrica existente, de la expansión de las redes hidrométricas y de otros mecanismos de seguimiento del recurso, sino también de reducción de la demanda de agua, con el fortalecimiento de los programas de ahorro y uso eficiente del agua y a la intensificación de los mecanismos limpios de producción.

## **5.2 Bases teóricas**

### **5.2.1 Dinámica de sistemas**

Jaimes (2016), considera que la dinámica de sistemas es una metodología para el estudio y manejo de sistemas de realimentación complejos; el uso del software permite realizar simulaciones bajo diferentes tipos de escenarios, lo que ofrece la posibilidad de estudiar el comportamiento y las consecuencias de las múltiples interacciones de los elementos de un sistema a través del tiempo. La dinámica de sistemas es útil para el estudio de fenómenos sociales ya que en ellos están implicados una gran cantidad de elementos e interrelaciones en los que la presencia de no linealidades determina el comportamiento y dificultan una solución analítica. Además, los efectos de las políticas y acciones ejercidas sobre estos sistemas se manifiestan en horizontes temporales diferentes y dilatados. Este hecho dificulta la construcción de laboratorios de experimentación donde se pueden probar diferentes políticas y observar sus consecuencias sobre el sistema. Por lo expuesto los modelos de simulación dinámica permiten estudiar cómo las políticas, decisiones, estructura y retrasos influyen en el crecimiento y la estabilidad de un sistema. Actualmente su ámbito de aplicación abarca la planificación y diseño de políticas corporativas, la gestión y las políticas públicas, el

modelo biológico y médico, el área de la energía y el medio ambiente, el desarrollo de la teoría en ciencias naturales y sociales, la toma de decisiones y la dinámica no lineal compleja.

Según Osorio (2010), la dinámica de sistemas es una metodología para la construcción de modelos de simulación para sistemas complejos, como lo que son estudiados por las ciencias sociales, la economía o la ecología; en dinámica de sistemas la simulación permite obtener trayectorias para las variables incluidas en el modelo mediante la aplicación de técnicas de integración numérica.

Silvio y Requena (1988), señalan que es una metodología de uso generalizado para modelar y estudiar el comportamiento de cualquier clase de sistemas y su comportamiento a través del tiempo y que tenga características de existencias de retardo y bucles de realimentación.

La dinámica de sistemas es una técnica para analizar el comportamiento de sistemas complejos a través del tiempo. Se basa en determinar los bucles de realimentación y los retrasos en la información. Lo que hace diferente al enfoque de dinámica de sistemas de otros enfoques para estudiar sistemas complejos, es el uso de ciclos de realimentación, y el empleo de modelos matemáticos. Estos elementos, que se describen como sistemas aparentemente simples, despliegan una desconcertante no linealidad.

Es una técnica de simulación por computadora para analizar y gestionar situaciones y problemas complejos. Originalmente desarrollada en 1950 para ayudar a los administradores corporativos a mejorar su comprensión de los procesos industriales, la dinámica de sistemas es actualmente usada en el sector público y privado para el análisis y diseño de políticas. Fue creada a principios de la década de 1960 por Jay

Forrester, aunque estudios similares ya existían como los modelos de poblaciones, de la MIT Sloan School of Management (Escuela de Administración Sloan, del Instituto Tecnológico de Massachusetts) con el establecimiento del MIT System Dynamics Group. En esa época había empezado a aplicar lo que había aprendido sus conocimientos de gestión de la producción a toda clase de sistemas.

La Dinámica de Sistemas se entiende, en el sentido de Forrester (1968), como una metodología para entender el cambio, utilizando las ecuaciones en diferencias finitas o ecuaciones diferenciales. Dada la representación de estos procesos podemos estudiar la dinámica del conjunto de los estados disponibles por el sistema que es el tema central de la modelación. La Dinámica de Sistemas tiene su origen en la década de los años 30 cuando se desarrolló la teoría de los servomecanismos, que son instrumentos en los que existe una retroalimentación desde la salida a la entrada.

#### **a) Aplicación**

Ante un ambiente altamente competitivo y cambiante, actualmente tiene muchas aplicaciones. Su uso en el análisis de sistemas ecológicos, sociales, económicos, entre otros, la han hecho indispensable en la toma de decisiones dentro de la industria y el sector público. Sistemas actuales tan complejos, como las cadenas de suministro, encuentran en la dinámica de sistemas una herramienta de análisis altamente confiable.

“Un área en la que se han desarrollado importantes aplicaciones es la de los sistemas ecológicos y medioambientales, en donde se han estudiado, tanto problemas de dinámica de poblaciones, como de difusión de la contaminación” (Sterman, 2000).

## **b) Fases para el desarrollo del modelo en dinámica de sistemas**

En el desarrollo de un modelo con dinámica de sistemas se observan cuatro fases: identificación del problema y análisis del comportamiento, modelado cualitativo o diagrama causal, modelado cuantitativo o diagrama de Forrester, y por último la fase de evaluación y análisis del modelo.

### **1. Fase de identificación del problema y análisis del comportamiento**

El primer paso para construir un modelo es especificar claramente el problema y familiarizarse con él, se comienza con recopilar información y enumerar todas las variables que consideremos adecuadas para el sistema. Después de haber comprendido el fenómeno a modelar, se definen los aspectos a tratar, es decir, se definen los alcances del modelo. Finalmente, se van identificando progresivamente los distintos elementos que forman parte del sistema al igual, que sus relaciones, llegando así al diagrama causal.

### **2. Fase del Modelado Cualitativo o causal del sistema**

El resultado de esta fase es el establecimiento del diagrama causal, el cual debe mostrar relaciones básicas en forma de bucles de realimentación. Esta segunda fase implica definir las influencias que se producen entre los elementos que integran el sistema, además se necesita saber de qué dependen las otras variables en las que se quiere influir. Es decir, hay que entender cómo funcionan unidas las relaciones causales entre las variables del sistema. En esta fase se debe proceder a asignar valores a los parámetros que intervienen en el modelo. No obstante, debe tenerse claro las limitaciones de su alcance y, cuando sea el caso, debe planearse su revisión en la medida que se cuente con datos nuevos.

#### **4. Fase del Modelado Cuantitativo del sistema**

En esta fase se hace claridad a que el diagrama causal no es suficiente para apreciar el comportamiento del sistema, donde se entiende que el comportamiento es la manera en la que las variables del modelo varían a lo largo del tiempo. Por tanto, es necesario incluir información sobre el tiempo y las magnitudes de las variables.

El objetivo final de esta fase es obtener un modelo cuantitativo del sistema para ser simulado en un ordenador, para ello se debe traducir el diagrama causal a un diagrama de Forrester que es un paso intermedio para la obtención de las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento del sistema. Durante este proceso se amplía y especifica la información aportada por el diagrama causal caracterizando las diferentes variables y magnitudes, estableciendo el horizonte temporal, la frecuencia de simulación.

#### **5. Fase de Evaluación y Análisis del Modelo**

Una vez finalizada las fases anteriores se procede a comprobar el modelo, mediante una serie de pruebas y análisis para evaluar su validez y calidad. Se debe estudiar el modelo considerando dos aspectos principales: el análisis de estructuras de realimentación y el análisis de sensibilidad.

En el análisis de las estructuras de realimentación se determina como las variaciones en los bucles del modelo conducen a diferencias en los resultados obtenidos, permitiendo establecer las relaciones entre las variables que mejor aproximan al comportamiento del sistema. Por otro lado, el análisis de sensibilidad del modelo determina, cuales son los parámetros que provocan variaciones apreciables en los resultados. Esto conduce a realizar estimaciones cuidadosas de dichos parámetros y una mayor atención en la construcción de hipótesis para escenarios posibles.

### **c) Diagrama causal**

Los diagramas causales son una herramienta útil en dinámica de sistemas. Ellos ilustran la estructura de realimentación del sistema, es el modelo cualitativo de la dinámica de sistemas, al ser una concepción conceptual, también sirven para identificar los mapas mentales de las personas u organizaciones.

Los diagramas causales son fundamentales para la dinámica de sistemas, pues además de lo anterior, sirven de guías para la elaboración y comprensión de los modelos. Al diagrama causal también se le suele llamar hipótesis dinámica.

“El diagrama causal es un diagrama que recoge los elementos clave del sistema y las relaciones entre ellos” (García ,2003).

Aracil (1990), manifiesta que un diagrama causal es el conjunto de las relaciones entre los elementos de un sistema, a las flechas que representan las aristas se puede asociar un signo, este signo indica si las variaciones del antecedente y del consecuente son, o no, del mismo signo, de este modo, asociando un signo a las relaciones de influencia, se tiene un diagrama que suministra una información más rica sobre la estructura del sistema, aunque continúe conservando su carácter cualitativo.

“Permite conocer la estructura de un sistema dinámico, la que viene representada por la especificación de las variables que aparecen de acuerdo a sus componentes, por el establecimiento de la existencia, o no, de una relación de causa-efecto entre cada par de variables, en este nivel lo único que interesa es si existen relaciones o no” (Shell, 1998).

Según Morlán (2010), un diagrama causal es una herramienta para mostrar la estructura y las relaciones causales de un sistema para entender sus mecanismos de realimentación en una escala temporal, los elementos básicos son las variables o

factores y los enlaces o flechas. Una variable es una condición, una situación, una acción o una decisión que puede influir o puede ser influida por, otras variables. Uno de los puntos fuertes de los diagramas causales es su capacidad de incorporar variables cualitativas, también llamadas variables.

“Constituye uno de los hitos importantes en el proceso de modelización, ya que para llegar al diagrama causal cada elemento debe tener un nombre propio; hay que tener detectadas las interrelaciones entre elementos y debe conocerse su signo. Con el establecimiento de diagrama causal, los elementos pasan a denominarse magnitudes (variables y parámetros); lo cual constituye un grado de formalización mayor al existente hasta entonces” (Mateu, 2004).

Según Galgano (1995), el diagrama causal es un gráfico que muestra las relaciones entre una característica y sus factores o causas. Una vez elaborado el diagrama causal, este representa de forma ordenada y completa todas las causas que pueden determinar cierto problema y constituye una utilísima base de trabajo para poner en marcha la búsqueda de sus verdaderas causas, es decir, el auténtico análisis causa efecto.

Luemberger (1997), manifiesta que el diagrama causal muestra el comportamiento del sistema, permite conocer la estructura de un sistema dinámico, dada por la especificación de las variables y la relación de cada par de variables.

Sterman (2000), manifiesta que los diagramas causales son una herramienta útil en dinámica de sistemas, ellos ilustran la estructura de realimentación del sistema, al ser una concepción conceptual, también sirven para identificar los mapas mentales de las personas u organizaciones.

Ramos y Dolado (2000), mencionan que un diagrama causal es un grafo orientado en el

que los nodos representan los elementos del sistema y las aristas las relaciones entre dichos elementos. Un aspecto importante a destacar es que las relaciones existentes entre dos nodos de este grafo representa realmente una relación de causa-efecto. Es decir, una arista en un diagrama causal que conecta a dos nodos, A y B, por ejemplo, indicará que si sobre A se produce un cambio de estado, éste afectará al estado de B.

Para indicar el modo en que un cambio en A afecta a B se suele etiquetar la arista que los conecta con un símbolo positivo o negativo. Se utiliza un signo positivo siempre que se quiera indicar que un cambio en A afecta en el mismo sentido a B; es decir, si se produce un aumento en A, entonces B aumentará, o si A disminuye, entonces también B disminuirá. Si, por el contrario, los cambios en A afectan de forma inversa a la evolución de B, es decir, un aumento en A produce una disminución en B o viceversa, entonces la arista se etiqueta con un signo negativo, según se indica a continuación.

**A**  $\longrightarrow$  **B**, Significa que “A tiene influencia en B”.

**A**  $\longrightarrow$  **B+**, Significa que “a un aumento de A corresponde un aumento de B”(relación positiva).

**A**  $\longrightarrow$  **B-**, Significa que “a un aumento de A corresponde una disminución de B” (relación negativa).

### **c.1) Bucle o lazo**

“Una cadena cerrada de relaciones causales recibe el nombre de bucle, realimentación o feed-back” (García, 2003).

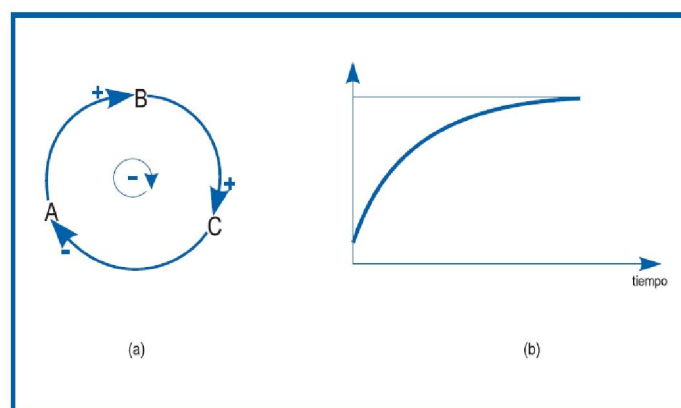
Según García (2003), la cibernética introduce la idea de circularidad a través del concepto de retroalimentación o feed-back, rompiendo con la ciencia newtoniana clásica en la que los efectos se encadenan de forma lineal, la idea de circularidad desarrollada por Wiener se centra en el feed-back negativo que permite la autorregulación del sistema ante posibles perturbaciones. En 1963 Maruyama estudió el feed-back positivo que, a diferencia del negativo amplifica la desviación (sistemas

“amplificadores”), la utilización de este concepto puede permitir explicar la evolución de los sistemas sociales en los cuales existen los dos tipos de retroalimentación.

### **c.2) Lazo de realimentación negativa**

Un bucle de realimentación negativa tiene la notable propiedad de que si, por una acción exterior, se perturba alguno de sus elementos, el sistema, en virtud de su estructura, reacciona tendiendo a anular esa perturbación. En efecto, consideremos el bucle de la Figura N° 1.1, en el que los elementos se han representado, de forma general, mediante las letras A, B y C. Supongamos que uno cualquiera de ellos, por ejemplo el B, se incrementa en virtud de las relaciones de influencia, el incremento de B determinará el de C, ya que la relación de influencia correspondiente es positiva. A su vez, el incremento de C determinará el decrecimiento de A, ya que así lo determina el carácter negativo de la influencia. El decrecimiento de A dará lugar al de B, pues la relación es positiva. Por tanto, el incremento inicial de B le «vuelve», a lo largo de la cadena de realimentación, como un decremento; es decir, la propia estructura de realimentación tiende a anular la perturbación inicial, que era un incremento, generando un decremento (Aracil, 1990).

Figura N° 1.1: Diagrama de un bucle de realimentación negativa(a) y comportamiento correspondiente (b).

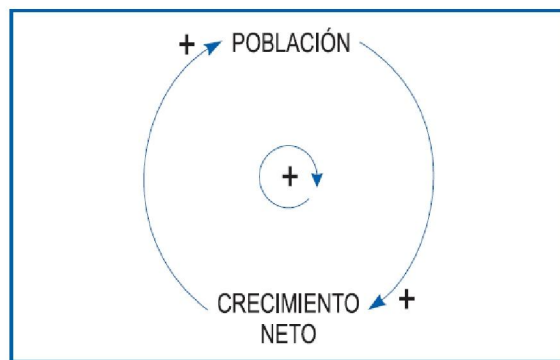


Fuente: (Aracil, 1990)

### c.3) Lazo de realimentación positiva

La otra forma que puede adoptar un bucle de realimentación es la que se muestra en la Figura N° 1.2, en la que se tiene un bucle de realimentación positiva. Se trata de un bucle en el que todas las influencias son positivas (o si las hubiese negativas, tendrían que compensarse por pares). En general la Figura N° 1.2 representa un proceso en el que un estado determina una acción, que a su vez refuerza este estado, y así indefinidamente. En este caso el estado es una población, y la acción su crecimiento neto. En tal caso, cuanto mayor sea la población, mayor es su crecimiento, por lo que a su vez mayor es la población, y así sucesivamente.

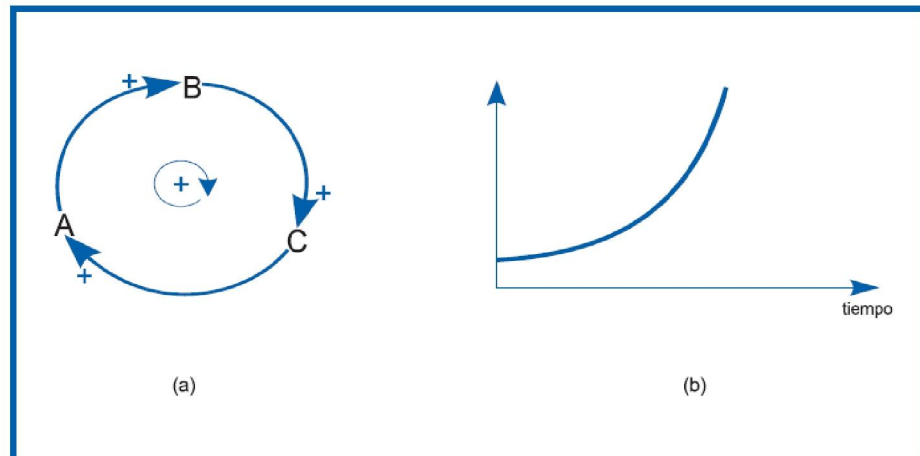
Figura N° 1.2: El crecimiento de una población como proceso de realimentación positiva.



Fuente: (Aracil, 1990)

En la Figura N° 1.3 se representa de forma esquemática, mediante las letras A,B y C un bucle de esta naturaleza, con ayuda de este diagrama se puede analizar, de forma general, el comportamiento que genera este bucle.

Figura N° 1.3: Estructura de realimentación positiva(a) y comportamiento correspondiente (b)

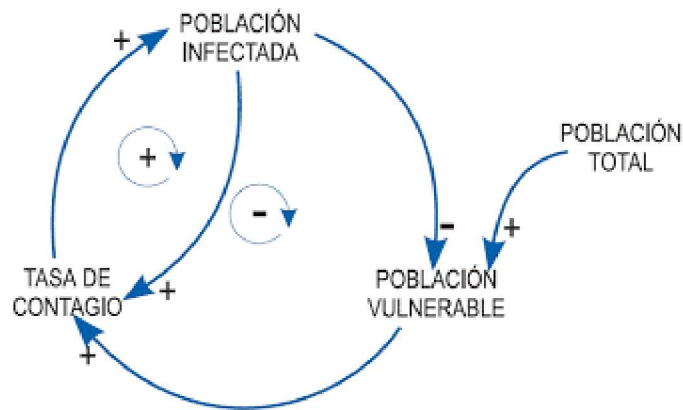


Fuente: (Aracil, 1990)

En su forma más simple el diagrama de influencias está formado por lo que se conoce como un grafo orientado. A las flechas que representan las aristas se puede asociar un signo. Este signo indica si las variaciones del antecedente y del consecuente son, o no, del mismo signo. Supongamos que entre A y B existe una relación de influencia positiva.

Ello quiere decir que si A se incrementa, lo mismo sucederá con B; y, por el contrario, si A disminuye, así mismo lo hará B. Por otra parte, si la influencia fuese negativa a un incremento de A seguiría una disminución de B, y viceversa. De este modo, asociando un signo a las relaciones de influencia, se tiene un diagrama que suministra una información más rica sobre la estructura del sistema, aunque continúe conservando su carácter cualitativo, el grafo correspondiente se dice que está signado.

Figura N° 1.4: Diagrama causal



Fuente: (Aracil, 2000)

#### d) Diagrama de Forrester

Un diagrama de Forrester permite la representación de las variables del modelo a través de tres tipos de variables: las de nivel, de flujo y auxiliares; los niveles representan magnitudes que acumulan los resultados de acciones tomadas en el pasado, las variables de flujo determinan las variaciones en los niveles del sistema, las variables auxiliares representan pasos o etapas en que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por los niveles. El diagrama de flujos también denominado diagrama de Forrester, es el diagrama característico de la Dinámica de Sistemas, es una traducción del diagrama causal a una terminología que permite la escritura de las ecuaciones en el ordenador para así poder validar el modelo, observar la evolución temporal de las variables y hacer análisis de sensibilidad.

Según Jaimes (2016), el diagrama de Forrester o modelo cuantitativo permite simular el comportamiento dinámico del fenómeno en estudio, al describir trayectorias temporales de todas las variables consideradas.

Morlan(2010), considera que una de las características distintivas de la dinámica de sistemas son los diagramas de niveles y flujos, más conocidos como diagramas de

Forrester, junto con la realimentación, los conceptos fundamentales de la dinámica de sistemas son los recipientes (stocks), llamados niveles, y los flujos.

Aracil (1992), conceptúa como el diagrama que se obtiene a partir de un diagrama de influencias, clasificando sus nodos en variables de nivel, flujo o auxiliares y asociando a esos nodos los iconos correspondientes recibe la denominación de diagrama de Forrester o diagrama de flujos-niveles.

”Es una representación simbólica de las variables de nivel, flujo y auxiliares de un diagrama causal una vez identificadas y constituye un paso intermedio entre el diagrama causal y el sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden que le corresponde” (Gordillo, 1995).

De acuerdo a Zavala (2011), los diagramas de Forrester son la representación matemática de los diagramas causales, se construyen clasificando las variables en variables de nivel, flujo o auxiliares, para formar un modelo integrado con ecuaciones diferenciales de primer orden.

Este tipo de diagrama es más completo que un diagrama causal es un paso intermedio entre el diagrama causal y el modelo matemático formal. Se clasifica las variables en tres tipos:

#### **d.1) Variables de nivel**

“Los niveles (stocks) suponen la acumulación en el tiempo de una cierta magnitud. Son las variables de estado del sistema, en cuanto que los valores que toman determinan la situación en la que se encuentra el mismo” (Antequera, 2012).

De acuerdo a García (2007), Los niveles reciben también el nombre de acumulaciones o variables del estado. Los niveles cambian sus valores acumulando o integrando los

flujos. Esto significa que los valores de los niveles cambian continuamente con el tiempo aun cuando los flujos cambien discontinuamente.

Constituyen un conjunto de variables cuya evolución es significativa para el estudio del sistema. La variable de nivel al evolucionar en el tiempo alcanza lo que se conoce con nombre de niveles, o estados del sistema y se representan por rectángulos. La elección de los elementos que se representan por niveles en un modelo determinado depende del problema específico que se esté considerando, sin embargo, una característica común a todos los niveles es que cambian lentamente en respuesta a variaciones de otras variables, a cada nivel se le puede asociar un flujo de entrada (FE) y un flujo de salida (FS).

#### **d.2) Variables de flujo**

“Los flujos expresan de manera explícita la variación por unidad de tiempo de los niveles. El flujo alimenta o reduce el nivel. Pensar en un cierto nivel de agua y en un grifo que lo abastece es una buena metáfora para mejor comprender los significados respectivos de estos dos tipos de variables” (Antequera, 2012).

“Indican la rapidez con la que están cambiando los niveles, es decir son las tasas que influyen en los niveles, tienen las mismas unidades que los niveles pero en función del tiempo” (Perez, 2003).

Determinan los cambios en las variables de nivel en el sistema. Las variables de flujo caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales quedan acumuladas en los correspondientes niveles. Debido a su naturaleza se trata de variables que no son medibles en sí, sino que se mide por los efectos que se producen en las variables de nivel de tal forma que las variables de nivel se asocian con ecuaciones que definen el comportamiento del sistema.

### **d.3) Variables auxiliares**

Para Antequera (2012), Las variables auxiliares son, como su nombre indica, variables de ayuda en el modelo. Su papel auxiliar consiste en colaborar en la definición de las variables de flujo y en documentar el modelo haciéndolo más comprensible.

Representa pasos o etapas en que se pone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores representados por los estados de la variable de nivel. La variable auxiliar une los canales de información entre las de nivel y de flujo, aunque en realidad son parte de las variables de flujo. Sin embargo, se distinguen de ellas en la medida que su significado real sea más explícito. Las variables auxiliares se pueden emplear para mostrar relaciones no lineales.

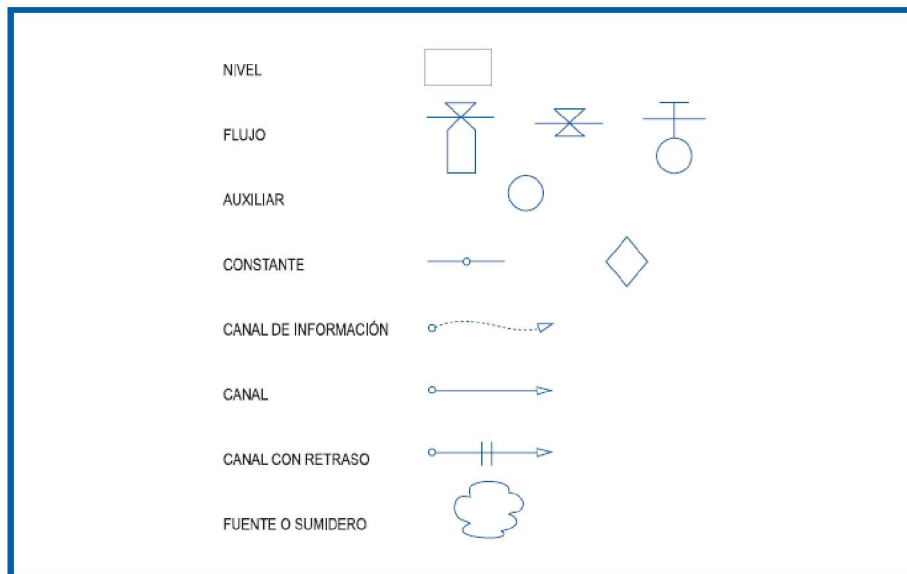
Agrupando los elementos mencionados obtenemos la estructura general de un modelo de dinámica de sistemas en la que a cada nivel se le puede asociar un flujo de entrada y un flujo de salida. En términos matemáticos es equivalente a una ecuación integral del saldo entre flujos o a una ecuación diferencial del saldo entre tasas de cambio de flujos, que indica la tasa neta de acumulación del nivel y puede ser resuelta por medio de métodos de aproximación como la ecuación de Euler, donde el valor que toma la variable de nivel en el instante  $t+\Delta t$  es el valor que tenía en  $t$  más el saldo neto de los flujos de entrada y salida en  $t$  multiplicado por el salto temporal  $\Delta t$ (ver Figura N° 1.5).

Figura N° 1.5: Formulación y simbología de Forrester

**Ecuación diferencial:**  $\frac{d(Nivel)}{dt} = \text{Cambio Neto en Nivel} = \text{Flujo de entrada}(t) - \text{Flujo de salida}(t)$

**Ecuación Integral:**  $Nivel(t) = Nivel(t_0) + \int_{t_0}^t [\text{Flujo de entrada}(t) - \text{Flujo de salida}(t)] dt$

**Ecuación de Euler:**  $Nivel(t+\Delta t) = Nivel(t_0) + \Delta t \times [\sum_i \text{Flujo de entrada}(t) - \sum_j \text{Flujo de salida}(t)]$



Fuente: Aracil (1995)

### 5.2.2 Abastecimiento del agua potable

Según Concha y Guillen (2014), consiste en un conjunto de obras que permiten que una población pueda obtener el agua para fines de consumo doméstico, servicios públicos, industrial y otros usos. Consiste en proporcionar agua a la población de manera eficiente considerando la calidad (desde el punto de vista físico, químico y bacteriológico), cantidad, continuidad y confiabilidad de esta.

“Conjunto de componentes hidráulicos e instalaciones físicas que son accionados por procesos operativos, administrativos y equipos necesarios desde la captación hasta el suministro del agua mediante conexión domiciliaria, para un abastecimiento convencional cuyos componentes cumplan las normas de diseño del Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento; así como aquellas modalidades que no se ajustan a esta definición como el abastecimiento mediante camiones cisterna u otras alternativas, se entenderán como servicios en condiciones especiales” (MINSA Perú,2005).

“Conjunto de tuberías, instalaciones y accesorios destinados a conducir las aguas requeridas bajo una población determinada para satisfacer sus necesidades, desde su lugar de existencia natural o fuente hasta el hogar de los usuarios” (SEDAPAL, 2010).

Un sistema de abastecimiento de agua es el conjunto de infraestructura, equipos y servicios destinados al suministro de agua para consumo humano. Los principales componentes hidráulicos en los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano, de acuerdo al tipo de suministro, son los siguientes:

#### **a) Fuentes de abastecimiento de agua cruda**

La fuente de agua más importante es la lluvia, ya que se recarga directamente en los embalses o en las cuencas de captación, dando vida a una red de ríos de una zona. El agua de la capa freática es agua de lluvia que se ha filtrado a través de capas de roca y se ha acumulado a lo largo de los años, esta se encuentra bajo presión y brota a la superficie en forma de manantial.

#### **b) Aguas superficiales**

“Estas comprenden ríos, lagos, arroyos, embalses canales, lagunas; que discurren naturalmente en la superficie terrestre” (Saravia, 2004).

Estos cuerpos de agua se conforman debido a los afloramientos que existen hasta la superficie del terreno y de las escorrentías superficiales debido a las lluvias, estos cuerpos de agua pueden ser ríos y lagos. A continuación se describen algunas características de estos cuerpos de agua:

**b.1) Los ríos:** Son corrientes de agua que fluyen por un lecho, desde un lugar elevado a otro más bajo. La gran mayoría de los ríos desaguan en el mar o en un lago, aunque

algunos desaparecen debido a que sus aguas se filtran en la tierra o se evaporan en la atmósfera.

**b.2) Los lagos:** Son masas de agua dulce o salada, más o menos extensa, embalsada en tierra firme. Las cuencas de los lagos pueden formarse debido a procesos geológicos como son la deformación o la fractura (fallas) de rocas estratificadas; y por la formación de una represa natural en un río debida a la vegetación, un deslizamiento de tierras, acumulación de hielo o la deposición de aluviones o lava volcánica (lagos de barrera). Las glaciaciones también han originado lagos, ya que los glaciares excavan amplias cuencas al pulir el lecho de roca y redistribuir los materiales arrancados (lago glaciar). Otros lagos ocupan el cráter de un volcán dormido o extinto (lago de cráter). El agua de un lago procede, por un lado, de la precipitación atmosférica, que lo alimenta directamente, y por otro, de los manantiales, arroyos y río.

### **c) Aguas subterráneas**

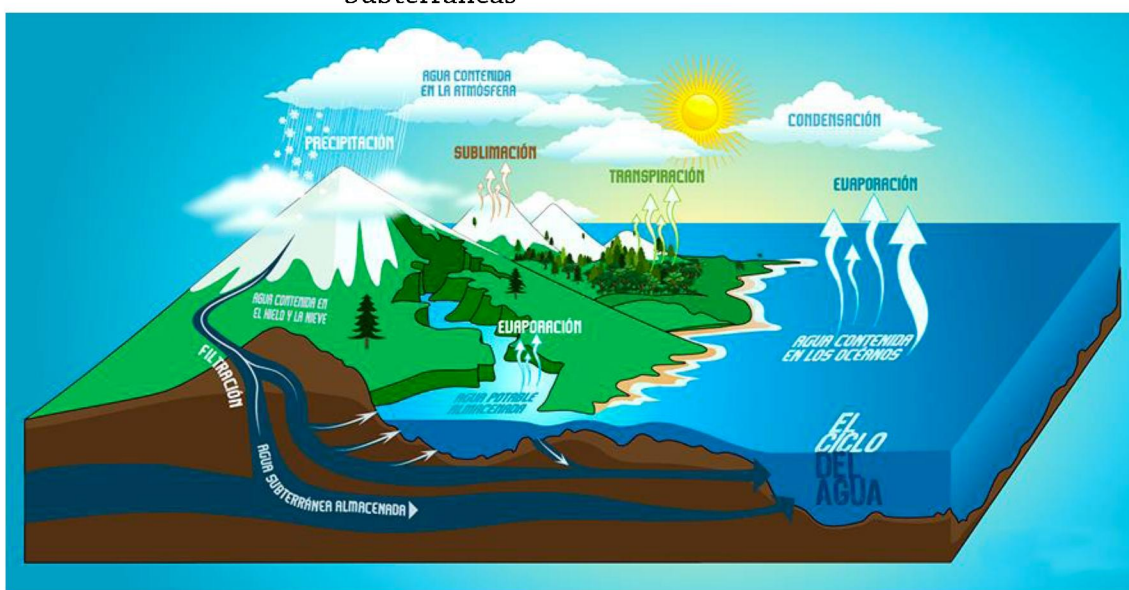
Bartoli (2008), las aguas se filtran en el suelo provenientes de las precipitaciones, ríos, lagos y lagunas de fondo permeable, descienden por acción de la gravedad y su velocidad de penetración es inversamente proporcional al grado de permeabilidad de los suelos que atraviesa; la captación de aguas subterráneas se puede realizar a través de manantiales, galerías filtrantes y pozos (excavados y tubulares).

El agua que cae sobre una superficie de terreno se divide en dos partes, una que conforma la escorrentía superficial que llega hasta ríos y lagos, pero la otra parte se infiltra en el suelo. Desde el suelo parte del agua sale por evapotranspiración o por manantiales alimentando a los ríos y lagos a través de su lecho.

Las rocas y suelos que dejan pasar el agua que cae como lluvia, se llaman permeables. El agua que penetra por los poros de una roca permeable acaba llegando a una zona

impermeable que la detiene. Entonces la parte permeable se va acumulando de agua (zona de saturación). La zona por encima de esta en la que el agua va descendiendo pero en los poros todavía hay aire se llama zona de aireación y el contacto entre las dos es el nivel freático. Las rocas porosas y permeables que almacenan y transmiten el agua se llaman acuíferos.

Figura N° 1.6: Representación gráfica sobre aguas superficiales y Subterráneas



Fuente: (ANA, 2010)

#### d) Captación de agua cruda

“Consiste en captar agua cruda desde las fuentes de la naturaleza, sean éstas superficiales o subterráneas y conducirla mediante gravedad o impulsión hacia la planta de tratamiento” (SUNASS, 2012).

Según SEDAPAL (2015), es el origen del abastecimiento, el agua bruta puede provenir de aguas superficiales (ríos, lagos, embalses, canales, etc) o de aguas subterráneas (pozos, manantiales, surgencias), cuanto mayor calidad tenga, menores serán los tratamientos de potabilización a los que habrá que someterla, en ocasiones se

construyen depósitos de reserva de agua bruta, que aseguran el suministro durante un cierto tiempo en caso de cortes de la fuente de abastecimiento.

Para Escolero (2009), son las obras necesarias para captar el agua de la fuente a utilizar y pueden hacer por gravedad, aprovechando la diferencia de nivel de terreno o por impulsión (bombas).

Según Orellana (2005), las obras de toma o captación de aguas superficiales tales como lagos, embalses y corrientes de agua de régimen permanente, deben ser adecuadas a la importancia del servicio a prestar, en los embalses se suelen construir torres de tomas libres o adosadas al paramento mojado del dique, en los ríos y lagos las obras de toma se colocan a una distancia prudencial de la orilla y la boca de afluentes a un nivel no alcanzable por las impurezas que flotan y por las que se puedan removerse del lecho. A modo de ejemplo se muestra en la figura N° 1.7 la captación de agua en un río.

Figura N° 1.7: Captación de agua ubicada en un río



Fuente: Orellana (2010)

### **e) Línea de conducción del agua**

La línea de conducción en un sistema de abastecimiento de agua potable por gravedad es el conjunto de tuberías, válvulas, accesorios, estructuras y obras de arte encargados de la conducción del agua desde la captación hasta el reservorio, aprovechando la carga estática existente. Debe utilizarse al máximo la energía disponible para conducir el gasto deseado, lo que en la mayoría de los casos nos llevara a la selección del diámetro mínimo que permita presiones iguales o menores a la resistencia física que el material de la tubería soporte.

Según SUNASS (2015), se entiende por línea de conducción al tramo de tubería que transporta agua desde la captación hasta la planta potabilizadora o bien hasta el tanque de regularización, dependiendo de la configuración del sistema de agua potable. Una línea de conducción debe seguir, en lo posible, el perfil del terreno y debe ubicarse de manera que pueda inspeccionarse fácilmente. Este se puede diseñarse para trabajar por gravedad o bombeo.

“Tiene por finalidad transportar el agua captada en las tomas hasta la planta de tratamiento, o desde la planta hasta la ciudad para su distribución, la línea de conducción puede ser un canal abierto o por conducto cerrado” (Orellana, 2005).

Figura N° 1.8: Conducción de agua cruda



Fuente: SEDA Ayacucho (2012)

### **f) Tratamiento de agua potable**

Según AGUASISTEC (2017), Una planta o estación de tratamiento de agua potable (ETAP) es un conjunto de estructuras y sistemas de ingeniería en las que se trata el agua de manera que se vuelva apta para el consumo humano.

Existen diferentes tecnologías para potabilizar el agua, pero todas deben cumplir los mismos principios:

- a. Combinación de barreras múltiples (diferentes etapas del proceso de potabilización) para alcanzar bajas condiciones de riesgo.
- b. Tratamiento integrado para producir el efecto esperado.
- c. Tratamiento por objetivo (cada etapa del tratamiento tiene una meta específica relacionada con algún tipo de contaminante).

El tratamiento de aguas y las plantas de tratamiento de agua son un conjunto de sistemas y operaciones unitarias de tipo físico, químico o biológico cuya finalidad es que a través de los equipamientos elimina o reduce la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales.

Figura N° 1.9: Planta de tratamiento de agua potable



Fuente: AGUASISTEC (2017)

### **g) Almacenamiento del agua potable**

Se hace necesario el almacenamiento de agua cruda cuando el caudal seguro y disponible de la fuente de abastecimiento no surte permanentemente la demanda del sistema. El volumen útil almacenado debe ser suficiente para suministrar agua sin racionamiento. El almacenamiento de agua tratada es un imperativo para poder atender, la demanda máxima horaria de la red de distribución de agua potable o la necesidad de garantizar y/o compensar las presiones en la red de distribución. Es tradicional y práctico almacenar el agua cruda en embalses y el agua tratada en tanques cerrados semienterrados. Los efectos y amenazas ambientales son obvios en cualquier caso, pero presentes sobre distintos parámetros del medio y con diferente intensidad.

Según la IAGUA (2018), Uno de los aspectos primordiales para cumplir con el suministro de agua potable a una población es su almacenamiento y regulación. Operar un sistema de distribución conlleva a conocer los criterios básicos operativos que se implementan, desde la variación de consumo a lo largo del día por parte de los consumidores hasta el manejo de los sistemas de válvulas y equipos de bombeo que se encuentran en cada uno de los tanques de almacenamiento.

Según R-Chemical (2018), para garantizar que sea potable, el agua debe manejarse con cuidado mientras se transporta y debe almacenarse en recipientes que la protejan de una contaminación posterior. El agua almacenada en tanques descubiertos, o en tanques con paredes agrietadas, o con tapas sueltas o mal hechas, se contamina fácilmente con residuos animales y microbios.

Figura N° 1.10: Almacenamiento de agua potable



Fuente: EMSAP Chanka

#### **h) Distribución de agua potable**

Para Ordoñez (2005), consiste en portear el agua potable desde la planta de tratamiento o estanques de distribución por medio de conducciones y entregarla en la entrada de la casa o industria del usuario, mediante una red de tuberías, este sistema comprende conducciones, red de tuberías de distinto diámetro, estanques y plantas de elevación de ser requerida impulsión

Según la OMS (2009), Los sistemas de distribución de agua potable transportan el agua desde una fuente de abastecimiento o planta de tratamiento hasta las personas que las consumen, la distribución de agua requiere infraestructura esta infraestructura puede variar desde complejos sistemas de tuberías hasta los más sencillos contenedores de agua.

De acuerdo a Becerra(2007), una red de distribución de agua potable es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta las tomas domiciliarias o hidrantes públicos, su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como el extinguir incendios.

**Redes matrices.**- Un componente de gran importancia en cuanto a infraestructura se refiere, para la conducción y distribución de agua potable son las redes por donde se conduce y distribuye, la malla principal del servicio de la Ciudad y que distribuye el agua procedente de la conducción desde las plantas de tratamiento, las redes matrices mantienen las presiones básicas de servicio para el funcionamiento correcto de todo el sistema y generalmente no reparten agua en ruta.

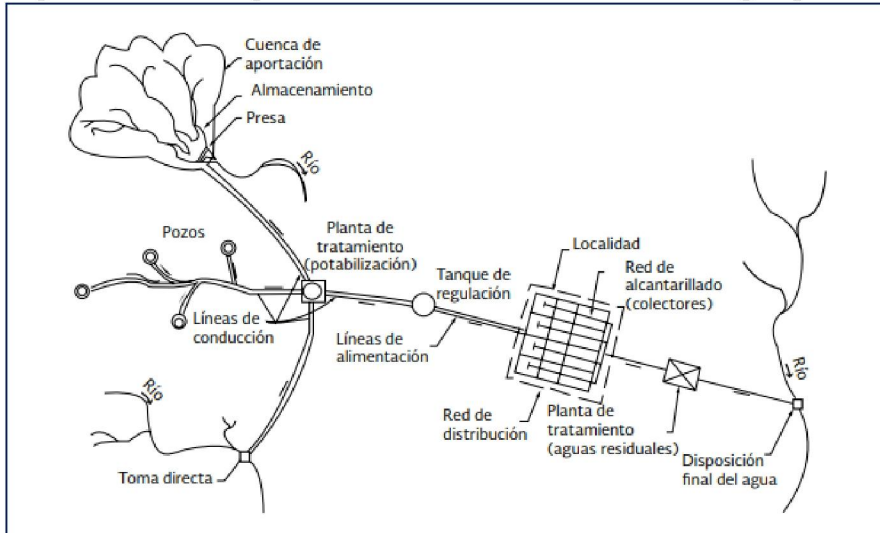
Figura N° 1.11: Distribución de agua potable



Fuente: SEDAPAL (2014)

La red de distribución de agua potable está constituida por un conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el líquido desde el tanque de agua tratada hasta la tomas domiciliaria o el hidrantes públicos. A los usuarios (domésticos, públicos, industriales, comerciales) la red deberá proporcionarles el servicio las 24 horas de cada uno de los 365 días del año, en las cantidades adecuadas y con una presión satisfactoria.

Figura N° 1.12: Esquema de una red de distribución de agua potable



Fuente: Batres (2010)

### 5.2.3 Producción de agua potable

Se puede producir agua potable a partir de cualquier fuente natural de agua como por ejemplo agua subterránea, lagos y ríos (agua superficial) o agua de mar. Los parámetros del agua potable están establecidos por la Organización Mundial de la Salud o por la Unión Europea. El agua destinada al consumo humano no puede contener sólidos suspendidos, microorganismos y compuestos químicos tóxicos. Su composición en minerales varía dependiendo del país pero para la mayoría de los minerales existe una concentración máxima que asegura un agua equilibrada, agradable para el consumo y segura.

“Captación y tratamiento de agua cruda, para su posterior distribución como agua potable, en las condiciones técnicas y sanitarias establecidas en las normas respectivas, se puede producir agua potable a partir de cualquier fuente natural de agua como por ejemplo agua subterránea, lagos y ríos (agua superficial) o agua de mar”. (Zapata, 2000).

Según Sedapar (2018), el proceso de producción de agua potable consiste en la realización de una serie de actividades que permiten la potabilización del agua, con el fin de entregar a los usuarios agua apta para el consumo humano, algunos de los procesos realizados para la potabilización son:

### **1. Captación**

A través de la tomas, el agua pasa por unas rejillas que evitan la entrada de elementos de gran tamaño, los cuales son retirados y eliminados, seguidamente el agua es pretratada y conducida hacia un desarenador que sedimenta las arenas suspendidas. El agua cruda o bruta continúa su recorrido hacia el rompe carga, donde simultáneamente es distribuida a las unidades de producción.

### **2. Coagulación**

Consiste en la neutralización de esas partículas, mediante el agregado de cargas de signo positivo, a través de un producto llamado coagulante. Este proceso dura unos pocos segundos y es necesario se produzca una agitación violenta para que la coagulación se mezcle completamente con el agua, en un tiempo lo más corto posible. Ese punto de máxima agitación, en donde se inyecta el coagulante, se llama mezcla rápida.

### **3. Floculación**

Luego de coagulada el agua, las partículas no presentan cargas en su superficie y no existen impedimentos para que se unan entre sí. Para lograr esto, el agua se debe agitar lentamente, de modo que las partículas coaguladas, al chocar, se vayan uniendo para dar lugar a otras de mayor tamaño llamadas FLÓCS. Este proceso debe hacerse bajo condiciones muy bien controladas, pues una agitación muy violenta en ésta etapa

puede producir rotura de óculos ya formados, en cambio una agitación muy lenta puede formar óculos esponjosos y débiles y difíciles de sedimentar.

#### **4. Sedimentación**

La sedimentación, es la primera etapa efectiva de separación de partículas del agua, donde se logra una reducción de turbiedad y color con respecto al agua cruda. En el sedimentador al reducirse la velocidad de circulación del agua, se produce la separación del fluido claro, que sobrenada la superficie y un lodo con una concentración elevada de materias sólidas que se depositan por efecto gravitacional y por tener peso específico mayor que el fluido.

#### **5. Decantación**

Los decantadores son la estructura física más visible de la planta. Allí, con el agregado de productos químicos, coagulantes y floculantes, las partículas se unen entre sí formando otras de mayor peso, que descienden hacia el fondo de los decantadores. Los decantadores instalados en las plantas, denominados Pulsator, son la principal innovación introducida en el sistema de potabilización. Realizan un movimiento de tipo “respiratorio” que mantiene el barro en suspensión en la parte media, y descargan el material excedente hacia las tolvas centrales que conducirán este material a la Planta de Tratamiento.

#### **6. Filtración**

Es la etapa final del proceso de clarificación del agua y la que debe dar las garantías de que el agua cumpla con las Normas de calidad de turbiedad y color. Consiste en pasar el agua a través de un medio poroso, en la mayoría de casos formado por arena seleccionada, para lograr la remoción de sólidos coloidales y suspendidos contenidos en el agua. En el filtro, se retienen las partículas de menor densidad (flocs pequeños) y

las que por algún motivo no fueron eliminadas en el sedimentador. Hoy en día se considera a la filtración como una de las principales barreras para la retención de microorganismos patógenos. Los filtros al colmatarse, deben lavarse y el tiempo que transcurre entre dos lavados consecutivos de un filtro de llama Carrera de Filtración.

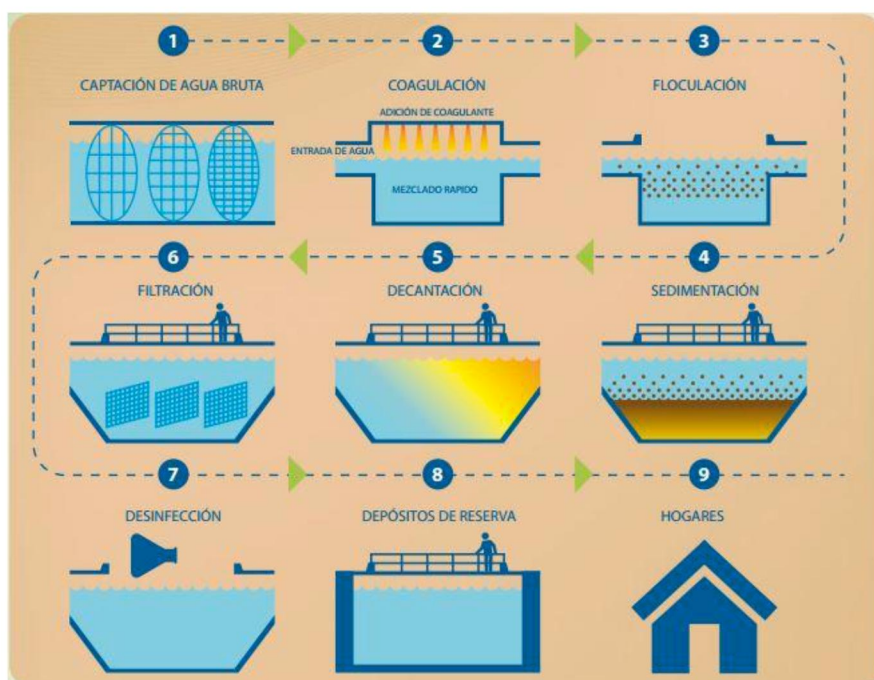
## **7. Desinfección**

Después del filtrado se realiza la desinfección con cloro para asegurar que el agua sea microbiológicamente inocua. El cloro es el producto químico más usado como desinfectante, pues posee un alto poder oxidante y residual. El cloro residual libre garantiza la desinfección a lo largo del sistema de distribución. Tiene por finalidad destruir los microorganismos patógenos presentes en el agua: (bacterias Salmonelas, Shigellas, Vibrio Cholerae, E. Coli), protozoarios y virus. Es necesaria porque no es posible asegurar la remoción total de los microorganismos por los procesos - fisicoquímicos y biológicos usualmente utilizados en el tratamiento de agua. En conclusión, tiene por objetivo garantizar la potabilidad del agua desde el punto de vista microbiológico.

## **8. Depósitos de Reserva**

El agua producida, apta para el consumo humano, se almacena en las reservas, donde se renueva de forma constante y desde donde es conducida a la red de distribución troncal y domiciliaria.

Figura N° 1.13: Procesos realizados para la producción del agua potable



Fuente: Sedapar (2015)

#### 5.2.4 Demanda del agua potable

Según la SUNASS (2013), la demanda por el servicio de agua potable está definida por el volumen que los distintos grupos de consumidores están dispuestos a consumir y pagar, las variables utilizadas para el cálculo de la demanda de agua potable son: población, consumo per cápita, número de conexiones activas, porcentaje de agua no contabilizada, nivel de micro medición. Para tal efecto a partir de la estimación de la población administrada se definen los niveles de cobertura del servicio de agua potable, estimando la población efectivamente servida. De la determinación de la población servida se realiza la estimación del número de conexiones por cada categoría de usuario, lo cual dado el volumen requerido por cada grupo de usuarios determinará la demanda por el servicio de agua potable que enfrentará la empresa prestadora de dicho servicio en los próximos años. Cabe precisar, que el volumen de la producción de

la empresa será equivalente a la demanda por el servicio de agua potable más el volumen de agua que se pierde en el sistema denominado pérdidas físicas.

“La demanda de agua potable se puede obtener a partir de los volúmenes de producción y de factores de consumo de agua por tipo de producto o servicio” (Domínguez, 2005).

“La demanda de agua potable se define como la cantidad y calidad de agua que pueden ser adquiridos por un consumidor (demanda individual) o por el conjunto de consumidores (demanda total o de mercado), en un momento determinado” (OMS, 2008).

### **5.2.5 Teoría general de sistemas**

“La Teoría General de sistemas se concibe como una serie de definiciones, de suposiciones y de proposiciones relacionadas entre sí por medio de las cuales se aprecian todos los fenómenos y los objetos reales como una jerarquía integral de grupos formados por materia y energía; estos grupos son los sistemas” (Tamayo, 2010).

Boulding denomina a “la Teoría General de Sistemas como “El esqueleto de la ciencia”, en el sentido de que ésta teoría busca un marco de referencia a una estructura de sistemas sobre el cual “colgar” la carne y la sangre de las disciplinas particulares en el ordenado y coherente cuerpo de conocimientos”.

Según García (2003), la teoría general de sistemas fue desarrollada por el biólogo Ludwig Von Bertalanffy la década de 1940, el enfoque sistémico pone en primer plano el estudio de las interacciones entre las partes y entre éstas y su entorno, una teoría general de sistemas, idealmente aplicable a cualquier sistema real o imaginable, deberá tratar sistemas con cualquier número de variables de carácter continuo o discreto.

Son las teorías que describen la estructura y el comportamiento de sistemas. La teoría de sistemas cubre el aspecto completo de tipos específicos de sistemas, desde los sistemas técnicos (duros) hasta los sistemas conceptuales (suaves), aumentando su nivel de generalización y abstracción.

La Teoría General de Sistemas (TGS) ha sido descrita como: una teoría matemática convencional - un metalenguaje - un modo de pensar una jerarquía de teorías de sistemas con generalidad creciente.

### **5.2.6 Enfoque sistémico**

“El enfoque sistémico es una disciplina preocupada por ver la totalidad en las estructuras que subyacen en los problemas de análisis. Observar las interrelaciones existentes entre las variables que representan el problema, se preocupa más por esto que por analizar las variables en forma aislada, procura patrones de cambio más que representaciones estáticas, analiza procesos en vez de objetos” (Gómez,2009).

El enfoque sistémico considera a todo objeto como un sistema o como componente de un sistema, entendiendo por sistema un conjunto de partes entre las que se establece alguna forma de relación que las articule en la unidad que es precisamente el sistema.

### **5.2.7 Pensamiento sistémico**

El pensamiento sistémico es la actitud del ser humano que percibe el mundo en término de un todo para realizar un análisis, es el llamado pensamiento sistémico, este difiere del planteamiento del método científico, lo desagrega en partes separadas.

Según Peter Senge, en su libro titulado La Quinta Disciplina (1993), el pensamiento sistémico es la actividad realizada por la mente con el fin de comprender el funcionamiento de un sistema y resolver el problema que presenten sus propiedades emergentes. El pensamiento sistémico es un marco conceptual que se ha desarrollado

en los últimos setenta años, para que los patrones totales resulten más claros y permitan modificarlos.

### **5.2.8 Simulación**

De acuerdo a Bolaños (2014), la simulación es la utilización de un modelo de sistemas, que trata de acercarse más a las características de la realidad, a fin de reproducir la esencia de las operaciones reales. Asimismo, es la representación de un proceso real, mediante el empleo de un modelo o sistema que reaccione de la manera similar a la que reaccionaría uno real, en un conjunto de condiciones dadas. La definición más general que se usa, se refiere a una técnica cuantitativa que utiliza un modelo matemático computarizado para representar la toma real de decisiones bajo condiciones de incertidumbre, con objeto de evaluar alternativas de acciones con base en hechos e hipótesis.

Con base en lo que se mencionó anteriormente, se puede decir que la simulación, es una técnica que imita el funcionamiento de un sistema del mundo real, al crear un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema, expresándolo en relaciones matemáticas o lógicas.

Thomas T. Goldsmith Jr. y Estle Ray Mann la definen así: "Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos."

Definió Robert E. Shannon, a la simulación como: "Es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir

experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema y evaluar varias estrategias con las cuáles se puede operar el sistema”.

Según García (2003), es la proyección de lo que ocurrirá en el mundo real a través del tiempo, el sistema cambia de estado debido a su dinámica interna o políticas planteadas. El propósito de diseñar el modelo, es hacernos percibir los límites de nuestra intuición cuando nos enfrentamos a una cierta complejidad, unos retrasos temporales o alguna realimentación. Con ello veremos los comportamientos posibles e imposibles que se pueden producir en el sistema. Para construir y simular el modelo de sistemas dinámicos se debe usar una técnica. Con ella realizaremos las tareas concernientes a la creación del modelo, tales como; construcción de niveles, determinación de flujos, establecimiento de variables auxiliares, determinación de constantes, horizonte de simulación, graficar las relaciones, determinación de ecuaciones o formalización, para luego simular el comportamiento del modelo y realizar nuestras conclusiones.

#### **5.2.8.1 Aplicaciones de la simulación**

Desde su aparición, la técnica de simulación ha ocupado un lugar de privilegio entre las herramientas de investigación de operaciones. Aun cuando se reconocían los enormes beneficios de la simulación como soporte a la toma de decisiones, las dificultades en la aplicación de esta técnica a la vida real de las compañías eran difíciles de realizar, ya que los modelos eran costosos de construir y validar, poco flexibles frente a condiciones inestables y habitualmente concebidos y manejados “por expertos”, no por operadores del sistema, de tal forma atentaban contra su efectiva aplicación a la problemática de las empresas.

En el campo de la logística, las principales aplicaciones de la simulación se centran en:

- a. Fenómenos de espera.
- b. Gestión de inventarios.
- c. Fiabilidad, mantenimiento y verificación de la calidad.
- d. Planificación, programación y Control de Proyectos.

La simulación de sistemas más popular es la de simuladores de vuelo, combate, etc., o cualquier videojuego que esté programado para brindarle al usuario una sensación de realidad, como si fueran ellos mismos los que estuvieran en una misión real.

En general, se puede hablar de tres tipos de aplicaciones:

**“Experimentación:** Es un modelo de simulación que es necesario cuando la experimentación directa sobre el sistema real es muy costosa o imposible y cuando el objetivo es diseñar un nuevo sistema, dado que el modelo puede ir modificándose fácilmente hasta obtener el comportamiento deseado.

**Predicción:** El modelo se puede usar para pronosticar el comportamiento del sistema real bajo ciertos estímulos. Se puede hacer así una evaluación de diferentes estrategias de acción.

**Enseñanza:** adiestramiento de astronautas, en los juegos de negocios, etc.”

### **5.2.8.2 Campos de aplicación de la simulación**

A continuación se describen algunas áreas en las que se aplica la simulación como herramienta de ayuda a la toma de decisiones estratégicas u operativas:

“Fabricación: Una de las áreas en donde tradicionalmente se ha aplicado intensivamente la simulación es en el campo de los procesos de fabricación y los sistemas de manipulación de materiales.

Redes de distribución: En el mundo de las corporaciones virtuales, ya no son las empresas productoras las que compiten entre sí, sino las redes de distribución, ya que dependen de un conjunto de suministradores, recursos de transporte, fábricas y almacenes para su correcto funcionamiento.

Transporte: Es un área con un interés creciente en las técnicas de simulación, ejemplos de simulación se pueden encontrar en todos los modos de transporte, ya sea aéreo, marítimo o terrestre. Estas empresas emplean la simulación para racionalizar sus circuitos de transporte y planificar mejor sus operaciones.

Sanidad: Es cada vez más fuerte la presión sobre el entorno sanitario para controlar los costos manteniendo o mejorando los niveles de servicio, el principal reto es incrementar la eficiencia en sus operaciones. La simulación es una herramienta adecuada para el análisis y la ayuda a la toma de decisiones por su capacidad para modelar estas relaciones y los factores aleatorios inherentes a estos sistemas.

Negocios: La simulación se aplica con éxito en el proceso administrativo propios a empresas de servicio como lo son los bancos, empresas de seguros y administración, como puede ser la circulación de documentos, la estimación de riesgos, etc.”

### **5.2.8.3 Etapas para realizar un estudio de simulación**

#### **a) Definición del sistema:**

Consiste en estudiar el contexto del problema, identificar los objetivos del proyecto, especificar los índices de medición de la efectividad del sistema, establecer

los objetivos específicos del modelamiento y definir el sistema que se va a modelar un sistema de simulación.

**b) Formulación del modelo:**

Una vez definidos con exactitud los resultados que se esperan obtener del estudio, se define y construye el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa el modelo.

**c) Colección de datos:**

Es importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados.

**d) Implementación del modelo en la computadora:**

Con el modelo definido, el siguiente paso es decidir si se utiliza algún lenguaje como el fortran, algol, lisp, etc., o se utiliza algún paquete como Automod, Promodel, Vensim, Stella y iThink, GPSS, simula, simscript, Rockwell Arena, Flexsim, etc., para procesarlo en la computadora y obtener los resultados deseados.

**e) Verificación:**

El proceso de verificación consiste en comprobar que el modelo simulado cumple con los requisitos de diseño para los que se elaboró. Evaluar que el modelo se comporta de acuerdo a su diseño del modelo.

**f) Validación del sistema:**

A través de esta etapa se valoran las diferencias entre el funcionamiento del simulador y el sistema real que se está tratando de simular. Las formas más comunes de validar un modelo son:

- a. La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación.
- b. La exactitud con que se predican datos históricos.
- c. La exactitud en la predicción del futuro.
- d. La comprobación de falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar al sistema real.
- e. La aceptación y confianza en el modelo de la persona que hará uso de los resultados que arroje el experimento de simulación.

**g) Experimentación:**

La experimentación con el modelo se realiza después que este haya sido validado. Comprobar los datos generados como deseados y en realizar un análisis de sensibilidad de los índices requeridos.

**h) Interpretación:**

En esta etapa del estudio, se interpretan los resultados que arroja la simulación y con base a esto se toma una decisión. Es obvio que los resultados que se obtienen de un estudio de simulación colaboran a soportar decisiones del tipo semi-estructurado.

**i) Documentación:**

Dos tipos de documentación son requeridos para hacer un mejor uso del modelo de simulación. La primera se refiere a la documentación del tipo técnico y la segunda se

refiere al manual del usuario, con el cual se facilita la interacción y el uso del modelo desarrollado.

#### **5.2.8.4 Metodología de la simulación**

La simulación se emplea sólo cuando no existe otro método que permita encarar la resolución de un problema. Siempre es preferible emplear una alternativa analítica antes que simular. Lo anterior no implica que una opción sea superior a otra, sino que los campos de acción no son los mismos. Mediante la simulación se han podido estudiar problemas y alcanzar soluciones que de otra manera hubieran resultado inaccesibles.

La simulación involucra dos facetas:

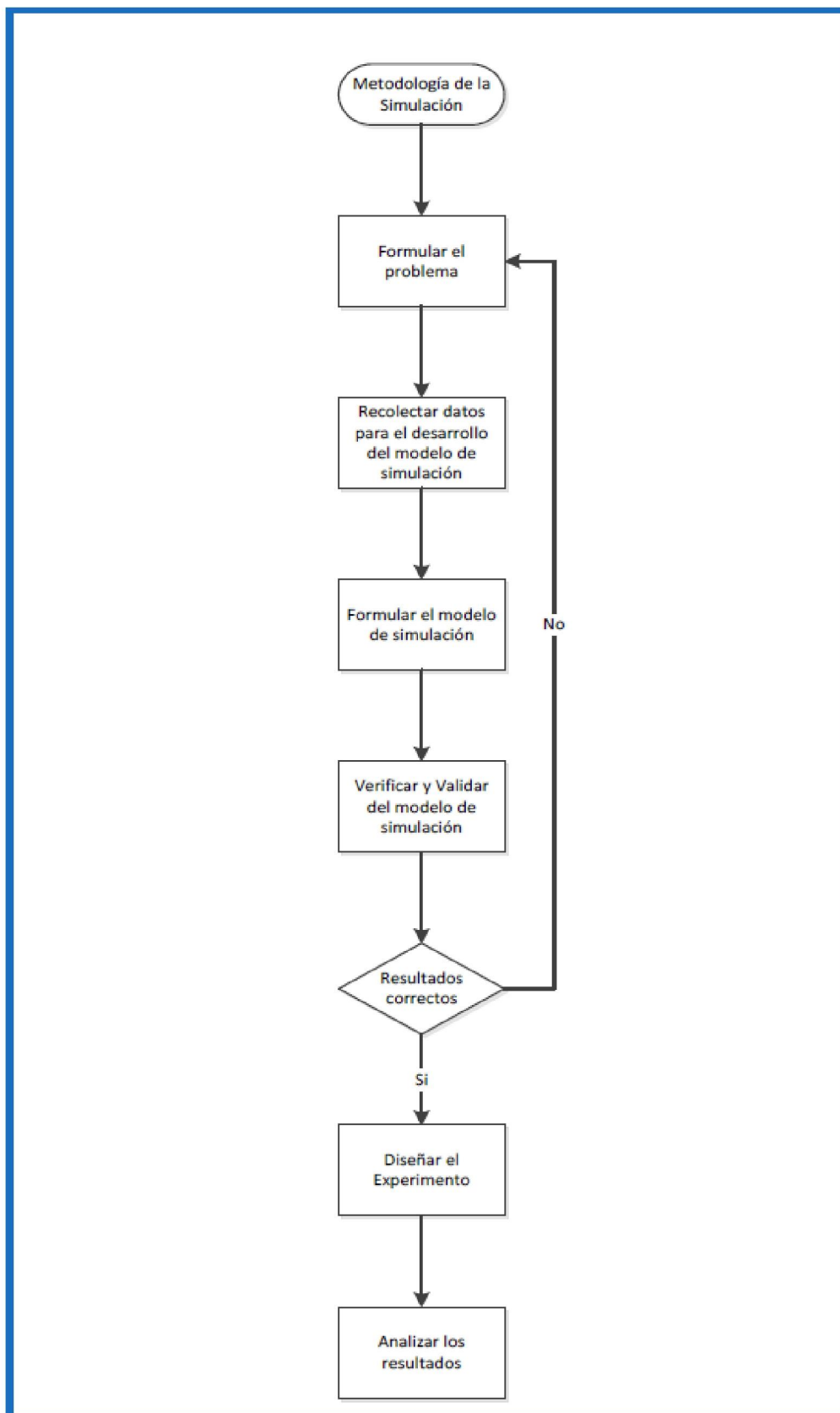
- 1) Construir el modelo.
- 2) Ensayar diversas alternativas con el fin de elegir y adoptar la mejor, para el desarrollo del sistema real, procurando que sea la óptima o que por lo menos sea lo suficientemente aproximada.

En la planeación de la simulación, es indispensable determinar los pasos a seguir para obtener los resultados deseados desde el inicio en que se ataca el problema, para evitar inconvenientes más adelante.

Para llevar a cabo la simulación del sistema que se quiere estudiar, en general se siguen una serie de pasos, representados en la Figura N° 1.14.

No necesariamente se debe seguir paso a paso este procedimiento, ya que este puede ser interactivo para que el modelo se pueda modificar en donde sea necesario (Figura N° 1.14), en algunas ocasiones los pasos se pueden repetir cuantas veces se crea necesario para lograr un buen modelo y efectuar la simulación.

Figura N° 1.14: Metodología de la Simulación



Fuente: Gordillo (1995)

### 5.2.8.5 Herramientas para el modelado y simulación

Según Andrade (2010), el avance en los sistemas computacionales facilitó el desarrollo de entornos software de modelado y simulación con dinámica de sistemas, en sus inicios estas herramientas facilitaban la labor de la simulación permitiéndole al modelador introducir las ecuaciones diferenciales o sistema de ecuaciones, para poder ser resueltos con sus algoritmos de métodos numéricos y luego entregar los resultados de la simulación. Posteriormente, estas herramientas evolucionaron para brindar soporte, no solo para la simulación, sino además para el modelado y el análisis de sensibilidad entre otras. Las más empleadas son:

**a) Professional DYNAMO.**-Es el más clásico de los lenguajes. No presenta posibilidades de modelado mediante iconos, pero sin embargo permite tratar ecuaciones de gran dimensión. La mayor parte de los modelos que se encuentran en los libros clásicos de la dinámica de sistemas están escritos en este lenguaje (Andrade, 2001).

**b) STELLA y i-think.**-Son entornos informáticos de amplia capacidad interactiva que permiten construir modelos empleando procedimientos gráficos, mediante iconos. Ambos poseen una estructura similar, pero mientras el primero se encuentra más orientado hacia usos académicos el segundo lo hace hacia aplicaciones profesionales. Ambos permiten construir los diagramas de Forrester en la pantalla del computador, de modo que al establecer su estructura se generan las ecuaciones. Se pueden agrupar elementos en sus modelos, y posee un zoom que permite desenvolverse con modelos complejos (Duran, 1995).



**c) PowerSim.**-Entorno de características análogas a los anteriores (mientras aquellos son americanos, este es europeo-en concreto noruego). Permite desarrollar varios modelos simultáneamente, e interconectarlos posteriormente entre sí (Pineda, 2000).




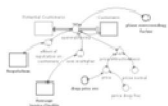

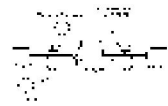

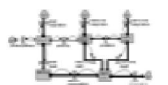


**d) VenSim.**-Con respecto a las anteriores presenta algunas ventajas con relación a la organización de datos y a posibilidades de optimización. Se trata de un lenguaje muy potente para el desarrollo de modelos que pueden emplearse tanto en entornos PC como en Unix. Permite documentar automáticamente el modelo según se va construyendo, y crea árboles que permiten seguir las relaciones de causa efecto a lo largo del modelo, está dotado de instrumentos para realizar análisis estadísticos (Cuellar, 1999).

**e) Mosaikk-SimTek.**-Mosaikk es una herramienta muy sofisticada para PC, que conecta directamente al **SimTek**, que es un lenguaje de modelado tipo DYNAMO que posee una gran versatilidad (Machado, 2006).

En la Tabla N° 1.1 se muestra las principales características de los softwares de simulación.

Tabla N° 1.1: Comparación de herramientas software para el modelado y simulación con dinámica de sistemas

Software / versión revisada	Organización	Diagrama de influencias	Diagrama flujo- nivel	Simulación	Herramientas de análisis	Costo	Idioma
 <p>ANYLOGIC Versión: Professional Edition 6.5.0</p>	XJ Technologies Company (Rusia)	No	<p>Permite dibujar diagramas de flujo-nivel en el editor de diagramas gráficos, usando elementos como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Stock</li> <li>- Flujo</li> <li>- Variable Auxiliar</li> <li>- Parámetro</li> <li>- Conector</li> <li>- Función Tabla</li> </ul>	<p>Soporta las siguientes formas de presentación de resultados:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diagrama de Gantt</li> <li>- Histograma</li> <li>- Estadísticas</li> <li>- Gráfico</li> </ul>	<p>Presenta varias herramientas de análisis como son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Comparación de corridas</i>: Compara los resultados de simulación para diferentes parámetros establecidos.</li> <li>- <i>Análisis de Sensibilidad</i>: Explora que tan sensibles son los resultados de simulación a la variación de los parámetros del modelo.</li> <li>- <i>Montecarlo</i>: ejecuta una simulación (estocástica) un número de veces, obteniendo la colección de salidas y viéndolo como un histograma.</li> <li>- <i>Calibración</i>: Ajusta los parámetros del modelo para que su comportamiento en condiciones particulares coincida con un patrón conocido (observado).</li> <li>- <i>Experimento de encargo</i>: Desarrolla su propio escenario usando AnyLogic API.</li> </ul>	US \$ 6,199	Inglés Ruso
 <p>EVOLUCIÓN Versión: 4.0</p>	Grupo SIMON de Investigación en Modelamiento y Simulación. (Colombia)	Cuenta con un Editor de Diagrama de Influencias. Tiene diferentes vistas y puede crear el diagrama con sus elementos, ciclos, clones, sectores y relaciones de material o de información entre ellos. Permite generar un bosquejo del Diagrama de Flujo Nivel.	Cuenta con un Editor de Diagrama de Flujo Nivel. Presenta diferentes vistas y una barra de herramientas con los elementos que forman el diagrama de flujo nivel para crear el modelo de simulación.	Presenta los resultados de la simulación en forma de gráficos en 2D y 3D, de tablas y gráficos animadores.	<p>Realiza el análisis de sensibilidad de dos formas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Por Variación de Escenarios.</li> <li>- Por Variación de Parámetros.</li> </ul> <p>En el <i>Análisis por Variación de Escenarios</i> se selecciona el elemento a analizar y se pueden manipular los escenarios existentes para el modelo. El <i>Análisis por Variación de Parámetros</i> define el comportamiento de la variable a analizar, al modificar el valor de uno de los parámetros del modelo.</p>	Software Gratuito para uso académico e investigativo.	Español

 <p>Ithink Versión: 9.1.4</p>  <p>Stella Versión: 9.1.4</p>	<p>Isee systems (Estados Unidos)</p>	<p>Se pueden crear diagramas de ciclos causales o de influencia de dos tipos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- diagramas de ciclos causales o de influencias híbridos: se utilizan para comunicar los bucles de realimentación en un modelo existente, ellos requieren al menos un stock.</li> <li>- diagramas de ciclos causales o de influencias regulares: son usados para crear mapas de relaciones causales de alto nivel, mostrando palabras (nombres) y flechas que indican la dirección de causalidad. Estos diagramas no requieren un stock.</li> </ul> 	<p>Permite elaborar modelos dinámicos que simulan sistemas experimentales con los elementos del diagrama de flujo- nivel como son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>stocks</i> o acumulaciones que recogen los flujos que llegan y salen de ellos.</li> <li>- <i>flujos</i> que permiten llenar y vaciar las acumulaciones.</li> <li>- <i>conectores</i> que conectan los elementos del modelo.</li> <li>- <i>convertidores</i> que tienen valores de constantes, define entradas externas al modelo, calcula relaciones algebraicas y sirve como depósito para funciones gráficas.</li> <li>- <i>módulos</i> son modelos independientes que se pueden conectar a otros modelos.</li> </ul> 	<p>Permite presentar los resultados a través de diferentes formas como tablas, gráficas, animaciones, películas QuickTime y archivos; estas representaciones pueden ser agregados al modelo, o se pueden crear interfaces que permite interactuar con la simulación a través de controles como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Regulador de dispositivos entrada</li> <li>- Lista de dispositivos entrada</li> <li>- Botón de dispositivos de entrada</li> <li>- Gráfico de dispositivos de entrada</li> <li>- Switch</li> <li>- Botón</li> <li>- Ciclo</li> </ul>	<p>El Análisis de Sensibilidad revela puntos de apalancamiento claves y condiciones óptimas del modelo.</p>	<p>Ithink 9.1.4 US \$ 1.899</p> <p>Stella 9.1.4 US \$ 1.899</p>	<p>Inglés</p>
 <p>POWERSIM Versión: STUDIO 8</p>	<p>Powersim Software AS (Noruega)</p>	<p>Se pueden realizar, con etiquetas de textos y líneas pero que no se conectan entre si (no es propiamente un modelo sino un dibujo).</p>	<p>Permite elaborar modelos con los elementos propios del Diagrama de Flujo-Nivel, entre ellos incluye los elementos: nivel, flujo continuo y discreto, constante, enlace, auxiliar, snapshot, submodelo, depósito, variables de vectores y otros elementos adicionales.</p> 	<p>Plasma la presentación de resultados de diversas formas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gráficas de tiempo</li> <li>- Tablas de tiempos</li> <li>- Gráficos</li> <li>- Gráficos de dispersión</li> <li>- Tabla</li> <li>- Indicador</li> <li>- Deslizador</li> <li>- Switch</li> </ul>	<p>Posee varias herramientas de análisis para estudiar y mejorar el comportamiento de la dinámica de los modelos creados con este software, estas son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis de riesgo.</li> <li>- Control de escenarios.</li> <li>- Optimización de políticas.</li> <li>- Gestión de riesgos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enterprise Expert</li> <li>• Professional</li> <li>• Executive</li> <li>• Cockpit</li> <li>• SDK US \$1442/usuario</li> <li>• GIS</li> <li>• Academic US \$226/usuario</li> </ul>	<p>Multi-lenguaje.</p> <p>Le permite mantener versiones en múltiples idiomas de todos los textos de un modelo.</p>
 <p>SIMILE Versión: 5.7</p>	<p>Simulistics Ltd (Reino Unido)</p>	<p>No</p>	<p>Se pueden crear los elementos del diagrama flujo-nivel (compartimientos, flujos, variables) y las relaciones o influencias entre ellos.</p> 	<p>Realiza la presentación de los resultados a través de gráficas, tablas o animaciones.</p>	<p>No</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enterprise Edition US \$ 1195</li> <li>• Standard Edition US \$ 595</li> <li>• Evaluation Edition FREE</li> </ul>	<p>Inglés</p>
 <p>VENSIM Versión: PLE 5.10a</p>	<p>Ventana System, Inc. (Estados Unidos)</p>	<p>Se pueden dibujar los elementos pertenecientes al Diagrama de Influencias en la ventana del editor, con sus respectivas variables, relaciones de influencia, bucles de realimentación y signos de polaridad (+ ó -). Se pueden imprimir y exportar los esquemas al portapapeles para su uso en otras aplicaciones.</p> 	<p>Posee una zona de dibujo para crear el modelo con los elementos del Diagrama de Flujo Nivel, como son nivel, flujo, variable auxiliar, constante, flecha. Los diagramas pueden ser personalizados de diferentes maneras. La norma para esquemas de Vensim es mostrar los niveles (acumulaciones) como una caja, con el nombre dentro de la caja. Los flujos se muestran con el nombre de la válvula de forma explícita, aunque a veces un flujo no tiene nombre (se muestra sólo una válvula). Las variables auxiliares, las constantes, tablas, los datos variables (externos), etc., se muestran sólo con su nombre.</p>	<p>Presenta los resultados de simulación en:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gráficos</li> <li>- Tablas</li> <li>- Tablas de Tiempo</li> <li>- Tira de causas</li> </ul>	<p>Presenta varias Herramientas de Análisis como son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diagramas de Árbol de Causas y Diagramas de Árbol de Usos: Permiten investigar la estructura del modelo.</li> <li>- Ciclos: Muestra todas las variables en todos los ciclos de realimentación.</li> <li>- Documento: Proporciona la documentación de todo el modelo, mostrando todas las ecuaciones del modelo en un formato de texto simple.</li> <li>- Gráfico y Tabla: Muestran el comportamiento de las variables.</li> <li>- Tira de Causas: Es una herramienta rápida y poderosa que nos ayuda a determinar qué porciones de un modelo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DSS US \$1995/usuario</li> <li>• Professional US \$1195/usuario</li> <li>• PLE Plus US \$169/usuario</li> <li>• PLE (Personal Learning Edition) US \$50/usuario</li> </ul>	<p>Chino Inglés Japonés</p>

Fuente: Andrade (2010)

### **5.2.8.6 Modelo**

Un modelo es la representación de la realidad, lo que diferencia unos modelos de otros es su utilidad, un sistema puede ser representados por una gran cantidad de modelos. La clave para construir un modelo útil es identificar de manera adecuada los elementos iniciales, definirlos de manera precisa y operativa para establecer las principales relaciones entre ellos.

“Un modelo es una representación de la estructura a simular. Es decir, una definición estática que define estructuras, parámetros y funciones (o algoritmos).” (Whicker y Sigelman, 1991).

“Un modelo puede ser una representación conceptual, numérica o gráfica de un objeto, sistema, proceso, actividad o pensamiento; destaca las características que el modelador considera más importantes del fenómeno en cuestión, por lo que se emplea para analizar exhaustivamente cada una de sus relaciones e interacciones, y con base en su análisis, predecir posibles escenarios futuros para dicho fenómeno. Así, un modelo puede describirse como una representación simplificada de un sistema real, y es en esencia, una descripción de entidades y la relación entre ellas” (García, 2008).

“Un objeto X es un modelo del objeto Y para el observador Z, si Z puede emplear X para responder cuestiones que le interesan acerca de Y” (Minsky, 1995).

### 5.2.8.7 Modelo de simulación

Según Bolaños (2014), los modelos de simulación consisten en variables de decisión, variables incontrolables y variables dependientes. Las variables de decisión están controladas por la persona que toma las decisiones y suelen cambiar de una a otra simulación, sin embargo, las variables incontrolables son eventos fortuitos que escapan al control de quienes toman las decisiones. Las variables dependientes reflejan los valores de las variables de decisión y los de las variables incontrolables.

La simulación de sistemas implica la construcción de modelos. El objetivo es averiguar qué pasaría en el sistema si acontecieran determinadas hipótesis. Un modelo es una representación simplificada de la realidad diseñada para representar, conocer y predecir propiedades del objeto real.

Los modelos se construyen con la finalidad de estudiar el objeto real con más facilidad y deducir propiedades difíciles de observar en la realidad:

- a. Eliminando o simplificando componentes
- b. Cambiando las escalas espacial o temporal
- c. Variando las condiciones del entorno
- d. Evitando la actuación sobre el objeto real
- e. Representar objetos o procesos de estudio

Los modelos de simulación se suelen clasificar en distintos tipos de acuerdo con los siguientes criterios:

a) **Modelo continuo:** Se define a través de ecuaciones diferenciales, ya que estas permiten conocer el comportamiento de las variables en un lapso de tiempo continuo, es decir, que las variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo.

b) **Modelo discreto:** En este tipo de simulación los cambios de estado del sistema

pueden representarse por medio de ecuaciones evaluadas en un punto determinado.

- c) **Modelos dinámicos:** El estado del sistema que se está estudiando varía a través del tiempo. Este tipo de simulación permite observar los cambios que ocurren en el estado del sistema durante cierto tiempo específico.
- d) **Modelos estáticos:** Este tipo de simulación representa un resultado bajo un conjunto de situaciones o condiciones determinadas y el efecto del tiempo no se tiene en cuenta.
- e) **Modelo determinístico:** Son relaciones constantes entre los cambios de las variables del modelo, es decir que tanto las variables de entrada como de salida son constantes.
- f) **Modelo probabilístico:** Tiene por lo menos una variable de entrada, la cual es independiente, y las variables de salida, que son dependientes. Ambas variables son aleatorias.

## **CAPITULO II**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **2.1 Tipo de investigación**

Según Carrasco(2006), la investigación tecnológica está dirigida a descubrir y conocer qué técnicas son más eficaces o apropiadas para operar, es decir, producir cambios o conservar los progresos alcanzados, así como perfeccionar las actividades o manipular cualquier fragmento de la realidad.

Rincón (2009), la investigación tecnológica comprende con mayor énfasis la transformación, cuyo fin es obtener conocimiento para lograr modificar la realidad en estudio, persiguiendo un conocimiento práctico.

De acuerdo a Córdoba (2007), la investigación tecnológica constituye un conocimiento aplicado y de uso práctico de manera inmediata, concretada en inventos, diseños e innovaciones.

El tipo de investigación para el presente trabajo será la investigación tecnológica.

#### **2.2 Nivel de investigación**

Según Bernal (2010), la investigación descriptiva es uno de los tipos o procedimientos investigativos más populares, son estudios de carácter eminentemente descriptivo, en tales estudios se muestran, narran, reseñan o identifican hechos, situaciones, rasgos, características de un objeto de estudio, o se diseñan productos, modelos, prototipos, guías, etcétera. Pero no se dan explicaciones o razones del porqué de las situaciones, los hechos, los fenómenos.

El nivel de investigación para el presente trabajo será descriptiva porque se está formulando un modelo y se aplicará como metodología de desarrollo la dinámica de sistemas.

## 2.3 Instrumentos y Técnicas

### 2.3.1 Instrumentos

Para recolectar información serán necesarios los reactivos que se presentan en la matriz de operacionalización de las variables, presentados en el Anexo A y la ficha de análisis documental que se muestra en el Anexo B. Para la técnica de entrevista se utilizará el instrumento guía de entrevista que se encuentra en el Anexo C, que se aplicó al gerente de operaciones de la EMPSAP Chanka.

### 2.3.2. Técnicas

Para el análisis de las variables se utilizará como metodología la dinámica de sistemas. Para el tratamiento y procesamiento de la información se utilizará la siguiente herramienta:

Tabla N° 2.1: Herramienta para la Simulación.

<b>Nombre</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Licencia</b>	<b>Simulación</b>
Vensim PLE	Ventana System Inc.(Estados Unidos).	Licencia libre y propietaria.	Presenta los resultados de simulación en: gráficos, tablas, tablas de tiempo, tira de causas.

Fuente: Elaboración propia

## Técnicas para aplicar dinámica de sistemas

Tabla N° 2.2: Actividades para el enfoque de sistemas

<b>TAREA</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>TÉCNICA</b>	<b>RESPONSABLES</b>
1. Identificar los componentes del sistema tanto internos y externos	Componentes del sistema identificados	a. Análisis documental b. Entrevista al gerente de operaciones	Analista del sistema de agua potable
2. Identificar el objetivo a alcanzar del sistema	Objetivo definido	Análisis del sistema	Analista del sistema de agua potable
3. Graficar el modelo del sistema	Gráfico del sistema	Enfoque sistémico	Analista del sistema de agua potable

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 2.3. Actividades para construir el diagrama causal

<b>TAREA</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>TÉCNICA</b>	<b>RESPONSABLE</b>
1. Identificar variables endógenas	Lista de variables endógenas	Análisis de componentes internos	Analista del modelo de simulación
2. Identificar variables exógenas	Lista de variables exógenas	Análisis de componentes externos	Analista del modelo de simulación
3. Listar variables incluidas	Lista de variables incluidas	Análisis de variables	Analista del modelo de simulación
4. Filtrar variables endógenas	Lista de variables excluidas endógenas	Análisis de componentes internos	Analista del modelo de simulación
5. Filtrar variables exógenas	Lista de variables excluidas exógenas	Análisis de componentes externos	Analista del modelo de simulación
6. Definir conceptualmente las variables incluidas	VARIABLES INCLUIDAS DEFINIDAS CONCEPTUALMENTE	Análisis documental	Analista del modelo de simulación
7. Elabora el diagrama causal	Diagrama causal	Análisis de causa-efecto	Analista del modelo de simulación
8. Identificar y analizar los lazos de realimentación	Lazos de realimentación del sistema	Análisis de variables retroalimentados	Analista del modelo de simulación

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 2.4: Actividades para construir el diagrama de Forrester

ACTIVIDAD	TAREA	PRODUCTO	TÉCNICA	RESPONSABLE
Identificar las variables para el diagrama de Forrester (Caracterizar los elementos)	Identificar las variables de flujo	Lista de variables de flujo	Identificando que variables transportan materiales o información	Analista del modelo de simulación
	Identificar las variables de nivel	Lista de variables de nivel	Identificando que variables aumentan o disminuyen materiales en el tiempo	Analista del modelo de simulación
	Identificar las variables auxiliares	Lista de variables auxiliares	Identificando que variables son necesarios para calcular los resultados de las variables de nivel y flujo	Analista del modelo de simulación
Construir el diagrama de Forrester	Relacionar las variables	Variables relacionados	Apoyarse con el diagrama causal	Analista del modelo de simulación
	Asignar valores a las variables	variables asignados con sus valores	Determinar y asignar valor a las variables	Analista del modelo de simulación
	Escribir las ecuaciones	Ecuaciones ingresados	Utilizar fórmulas aritméticas, hacer uso de las funciones que el software nos facilita, o bien utilizar las tablas cuando sea difícil establecer una ecuación.	Analista del modelo de simulación
	Crear una primera versión del modelo	Diagrama de Forrester	Utilizar la tecnología de información Vensim para crear el diagrama de Forrester	Analista del modelo de simulación

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 2.5: Actividades para la validación de la estructura del modelo

<b>TAREA</b>	<b>PRODUCTO</b>	<b>TÉCNICA</b>	<b>RESPONSABLE</b>
Comprobar la sintaxis del modelo	Sintaxis del modelo comprobado	Uso del software de simulación Vensim	Analista del modelo de simulación
Comprobar la coherencia de las unidades de las variables	Coherencias de las unidades de la variables comprobadas	Uso del software de simulación Vensim	Analista del modelo de simulación
Formalizar el modelo	Ecuaciones del modelo	Uso del software de simulación Vensim	Analista del modelo de simulación
Generar tablas del modelo para comparar con datos históricos	Tablas de resultados del modelo(2013-2050)	Uso del software de simulación Vensim	Analista del modelo de simulación

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 2.6: Actividades para la simulación del modelo.

<b>TAREA</b>	<b>PRODUCTO</b>	<b>TÉCNICA</b>	<b>RESPONSABLE</b>
Generación de gráficos y tablas del modelo	Gráficos y tablas del modelo(2013-2050)	Uso del software de simulación Vensim	Analista del modelo de simulación
Simulación de las variables del modelo	Proyecciones a partir de la simulación del modelo(2013-2050)	Tecnología de información Vensim	Analista del modelo de simulación

Fuente: Elaboración propia

## **2.4 Diseño**

Según Carrasco (2005), el diseño de la investigación es el plan o estrategia que se desarrolla para obtener información que se requiere en una investigación.

De acuerdo a Carrasco (2005), la investigación no experimental son estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en lo que solo se observan fenómenos en su ambiente natural para luego analizarlos.

Carrasco (2005), manifiesta que en un diseño transversal descriptivo se indagan la incidencia de las modalidades, categorías y niveles de una o más variables en una población, son estudios puramente descriptivos.

En el presente trabajo de investigación el diseño es implícito a los subtítulos que se tiene sobre la población, muestra, técnicas, instrumentos y operacionalización de las variables para levantar la información. Siendo una investigación descriptiva, el tipo de diseño aplicado es no experimental y transversal, que se muestra en las técnicas, instrumentos y operacionalización de las variables que tienen relación con los problemas y objetivos planteados.

## **2.5 Fuentes de información**

Se utilizará el análisis documental y la entrevista que tiene como objeto identificar los componentes internos, externos y el funcionamiento del sistema de agua potable.

Para el análisis documental se revisará diferentes fuentes ya sean estas físicas o magnéticas de las cuales se recopilarán datos para identificar los componentes del sistema de agua potable en la ciudad de Andahuaylas; también se recopilarán datos históricos, actuales; y se usará la ficha de análisis documental.

Para la técnica de entrevista se utilizará el instrumento guía de entrevista, que se aplicará al gerente de operaciones de EMSAP CHANKA.

## **CAPITULO III**

### **RESULTADOS**

#### **3.1. ENFOQUE SISTEMICO**

##### **3.1.1 COMPONENTES DEL SISTEMA**

###### **A. COMPONENTES INTERNOS DEL SISTEMA**

Basado en el contexto interno del sistema, fundamentalmente compuesto por todos los subsistemas internos del sistema de agua potable de la ciudad de Andahuaylas.

- a. Captación de agua cruda
- b. Potabilización de agua potable
- c. Distribución de agua potable
- d. Almacenamiento de agua potable
- e. Población ciudad de Andahuaylas
- f. Consumo de agua potable

###### **B. COMPONENTES EXTERNOS DEL SISTEMA**

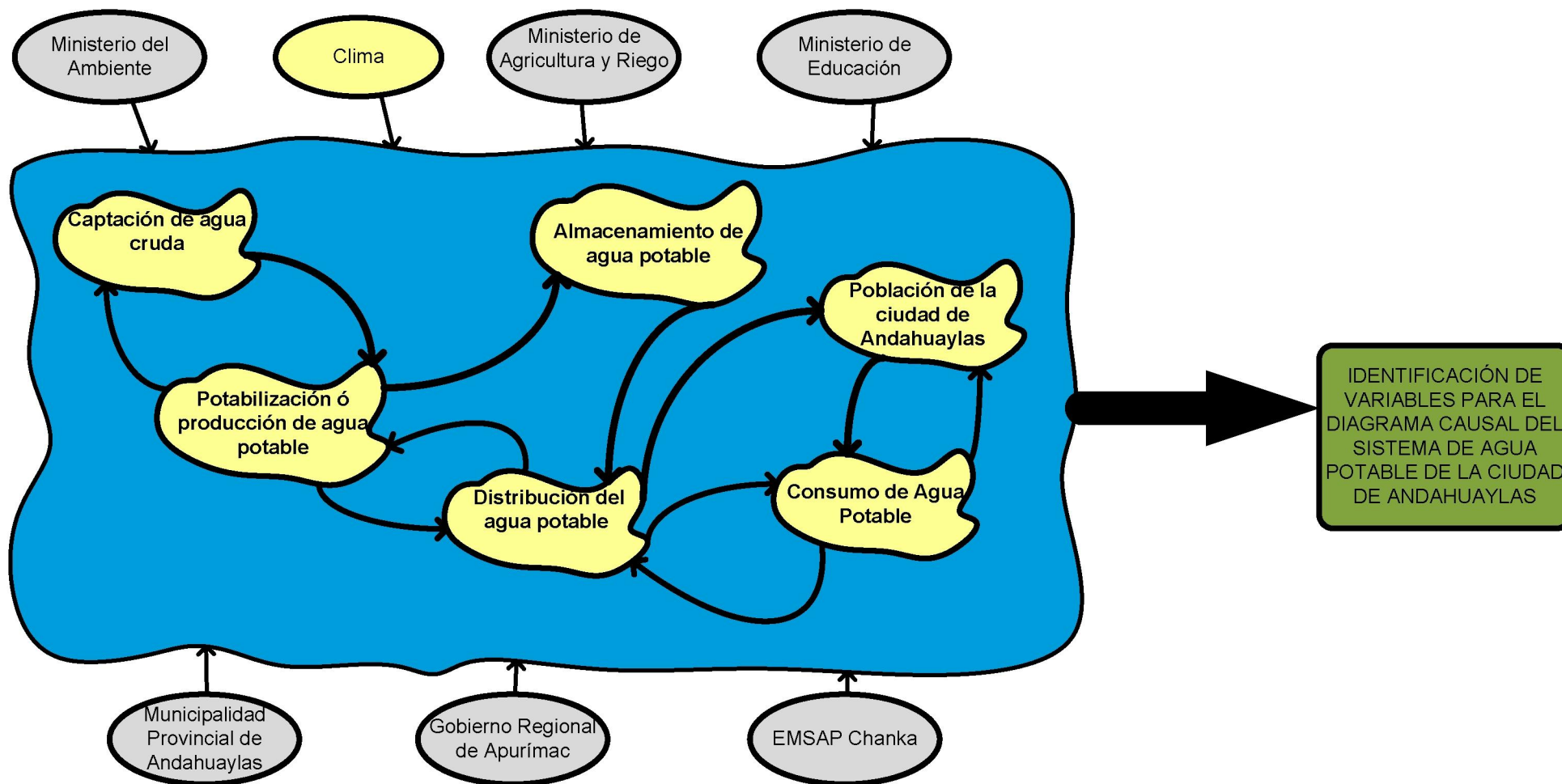
- a. Clima
- b. Ministerio del ambiente
- c. Ministerio de agricultura y riego
- d. Ministerio de educación
- e. Municipalidad Provincial de Andahuaylas
- f. Gobierno Regional de Apurímac
- g. EMSAP Chanka

##### **3.1.2 OBJETIVO DEL SISTEMA**

Identificación de variables para el diagrama causal del sistema de agua potable de la ciudad de Andahuaylas.

##### **3.1.3. GRÁFICO DEL MODELO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE**

Figura N° 3.1: Modelo del sistema de agua potable



## **3.2 DIAGRAMA CAUSAL**

### **3.2.1 LISTA DE VARIABLES ENDÓGENAS**

#### **A. COMPONENTE: CAPTACIÓN AGUA CRUDA**

- v1: Caudal captación Wassipara(m<sup>3</sup>/mes)
- v2: Caudal captación Plaza\_Armas (m<sup>3</sup>/mes)
- v3: Caudal captación Tonlinco\_Huaycco (m<sup>3</sup>/mes)
- v4: Volumen captado agua cruda (m<sup>3</sup>)
- v5: Aportes de agua(m<sup>3</sup>/mes)
- v6: Caudal líneas de conducción(m<sup>3</sup>/día)
- v7: Suministro Agua1(m<sup>3</sup>/mes)
- v8: Suministro Agua2(m<sup>3</sup>/mes)

#### **B. COMPONENTE: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE**

- v1: Producción agua potable planta N°1(m<sup>3</sup>/mes)
- v2: Producción agua potable planta N°2(m<sup>3</sup>/mes)
- v3: Reservorio Tonlinco Huaycco(m<sup>3</sup>/mes)
- v4: Reservorio Resurrección (m<sup>3</sup>/mes)
- v5: Producción unitaria(lt/Hab/día)
- v6: Costo operativo por m<sup>3</sup> producido(Soles)
- v7: NivelMáximo1(1/mes)
- v8: NivelMáximo2(1/mes)
- v9: EntradaPT1(m<sup>3</sup>/mes)
- v10: EntradaPT2(m<sup>3</sup>/mes)
- v11: NivelMáximoR1(1/mes)
- v12: NivelMáximoR2(1/mes)

v13: Productividad1(m<sup>3</sup>/mes)

v14: Productividad2(m<sup>3</sup>/mes)

### **C. COMPONENTE: CONSUMO DE AGUA POTABLE**

v1: Consumo promedio por uso industrial(m<sup>3</sup>)

v2: Consumo promedio por uso comercial(m<sup>3</sup>)

v3: Consumo promedio por uso doméstico(m<sup>3</sup>)

v4: Consumo promedio por uso estatal (m<sup>3</sup>)

v5: Consumo promedio por uso social (m<sup>3</sup>)

v6: Consumo Per-capita AguaPotable(lt/Hab/día)

v7: Demanda poblacional de agua potable (m<sup>3</sup>/día)

### **D. COMPONENTE: DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

v1: Volumen agua potable reservorio de cabecera(m<sup>3</sup>)

v2: Fugas de agua en el sistema(m<sup>3</sup>/día)

### **E. COMPONENTE: POBLACION CIUDAD DE ANDAHUAYLAS**

v1: Densidad poblacional(hab/km<sup>2</sup>)

v2: Número de habitantes por vivienda(hab/vivienda)

v3: Tasa de natalidad(Porcentaje)

v4: Tasa de mortalidad(Porcentaje)

v5: Población ciudad de Andahuaylas(Persona)

v6: Nacimientos Andahuaylas(personas/año)

v7: Defunciones Andahuaylas(personas/año)

### **3.2.2 LISTA DE VARIABLES EXOGENAS**

#### **A. COMPONENTE: CLIMA**

v1: Cambio climático(adimensional)

v2: Temperatura del aire(°C)

v3: Precipitación fluvial(Mm)

v4: Humedad relativa (%)

### **3.2.3 LISTA DE VARIABLES INCLUIDAS**

a. Caudal captación Wassipara(m<sup>3</sup>/mes)

b. Caudal captación Plaza\_Armas (m<sup>3</sup>/mes)

c. Caudal captación Tonlinco\_Huaycco (m<sup>3</sup>/mes)

d. Volumen captado de agua cruda (m<sup>3</sup>)

e. Aporte de Agua(m<sup>3</sup>/mes)

f. Suministro Agua1(m<sup>3</sup>/mes)

g. Suministro Agua2(m<sup>3</sup>/mes)

h. Planta Tratamiento N° 1(m<sup>3</sup>)

i. Planta tratamiento N° 2(m<sup>3</sup>)

j. Producción agua potable Tonlinco\_Huaycco (m<sup>3</sup>)

k. Producción agua potable Resurrección(m<sup>3</sup>)

l. Consumo Per-capita AguaPotable(lt/Hab/día)

m. Demanda poblacional de agua potable(m<sup>3</sup>/día)

n. Volumen agua potable reservorio de cabecera(m<sup>3</sup>)

o. Tasa de natalidad(Porcentaje)

p. Tasa de mortalidad(Porcentaje)

- q. Población Andahuaylas(Persona)
- r. Defunciones Andahuaylas(Personas/año)
- s. Nacimientos Andahuaylas(Personas/año)
- t. NivelMáximo1(1/mes)
- u. NivelMáximo2(1/mes)
- v. EntradaPT1(m3/mes)
- w. EntradaPT2(m3/mes)
- x. NivelMáximoR1(1/mes)
- y. NivelMáximoR2(1/mes)
- z. Productividad1(m3/mes)
- aa. Productividad2(m3/mes)

### **3.2.4 LISTA DE VARIABLES EXCLUIDAS ENDOGENAS**

#### **A. COMPONENTE: CAPTACIÓN AGUA CRUDA**

v1: Caudal líneas de conducción (m3)

#### **B. COMPONENTE: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE**

v1: Producción unitaria (lt/Hab/dia)

v2: Costo operativo por m3 producido (Soles)

#### **C. COMPONENTE: CONSUMO DE AGUA POTABLE**

v1: Consumo promedio por uso industrial(m3)

v2: Consumo promedio por uso comercial(m3)

v3: Consumo promedio por uso doméstico(m3)

v4: Consumo promedio por uso estatal (m3)

v5: Consumo promedio por uso social (m3)

#### **D. COMPONENTE: DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

v1: Fugas de agua en el sistema (m<sup>3</sup>/día)

#### **E. COMPONENTE: POBLACION CIUDAD DE ANDAHUAYLAS**

v1: Densidad poblacional(hab/km<sup>2</sup>)

v2: Número de habitantes por vivienda(hab./vivienda)

### **3.2.5 LISTA DE VARIABLES EXCLUIDAS EXOGENAS**

#### **A. COMPONENTE: CLIMA**

v1: Temperatura del aire(°C)

v2: Precipitación fluvial(Mm)

v3: Humedad relativa (%)

### **3.2.6 VARIABLES INCLUIDAS DEFINIDOS CONCEPTUALMENTE**

**Fuente Captación Wassipara.**-Es el caudal promedio aportado por la fuente de Wassipara, la cual llega al reservorio de resurrección, esta fuente se encuentra ubicado en el distrito de San Jerónimo, es la fuente que aporta con la mayor cantidad de agua, el rendimiento de este manantial ha venido disminuyendo en los últimos años.

**Fuente Captación Tonlinco Huaycco.**-Es el caudal promedio aportado por la fuente de captación del mismo nombre lo cual está ubicado en el distrito de Andahuaylas, el rendimiento de este manantial ha venido disminuyendo en los últimos años lo causa sería posiblemente el cambio climático.

**Fuente Captación Plaza de Armas.**-La captación se encuentra a 100 metros de la plaza de armas de Andahuaylas aproximadamente a 2,923 m.s.n.m, a diferencias de los otros dos manantiales, el rendimiento de este manantial no ha tenido disminuciones.

**Producción Agua Potable Tonlinco Huaycco.**-Es el volumen producido de agua potable que sale del reservorio Tonlinco Huaycco para alimentar de agua potable al reservorio de cabecera.

**Producción Agua Potable Resurrección.**-Es el volumen producido de agua potable que sale del reservorio Resurrección para alimentar de agua potable al reservorio de cabecera.

**Suministro Agua1.**-Es el volumen de agua cruda que suministra al reservorio Tonlinco Huaycco para la potabilización de agua cruda a agua potable

**Suministro Agua2.**-Es el volumen de agua cruda que suministra al reservorio Resurrección para la potabilización de agua cruda a agua potable.

**Volumen agua potable reservorio de cabecera.**-Es el volumen de agua disponible (disponibilidad) para su distribución a los diferentes reservorios de la ciudad y que de cada reservorio se distribuye a ciertos sectores de la ciudad.

**Consumo Per-capita Agua Potable.**-Es el consumo de litros de agua potable por mes por persona.

**Población ciudad Andahuaylas.**-Es el tamaño de la población que nos interesa en este caso correspondiente a los 03 distritos que conforman la ciudad de Andahuaylas.

**Tasa de natalidad.**-es el porcentaje o medida de nacimientos al año, tomando en cuenta al tamaño de la población.

**Tasa de mortalidad.**-es el porcentaje o medida de defunciones al año, tomando en cuenta al tamaño de la población.

**Nacimientos Andahuaylas.**-es la cantidad de nacimientos que se tiene en la ciudad de Andahuaylas y que incrementan el número a la población.

**Defunciones Andahuaylas.**-es la cantidad de defunciones que se tiene en la ciudad de Andahuaylas y que reducen el número a la población.

**Demanda poblacional de agua potable.**- es el volumen que los distintos grupos de consumidores están dispuestos a consumir y pagar.

**Cambio climático.**-es el cambio en el clima debido a la contaminación ambiental y otros factores la cual afecta en la disminución del caudal en las fuentes de abastecimiento.

**EntradaPT1.**-Es el switch que regula el flujo del agua que entra al reservorio Tonlinco Huaycco.

**EntradaPT1.**-Es el switch que regula el flujo del agua que entra al reservorio Resurrección.

**NivelMáximo1.**-Es la cantidad de agua que el reservorio Tonlinco Huaycco puede almacenar para evitar reboses.

**NivelMáximo2.**-Es la cantidad de agua que el reservorio Resurrección puede almacenar para evitar reboses.

**Productividad1.**-Regula la tasa de producción de la fuente de suministro de agua potable del reservorio Tonlinco Huaycco al reservorio de cabecera.

**Productividad2.**-Regula la tasa de producción de la fuente de suministro de agua potable del reservorio Resurrección al reservorio de cabecera.

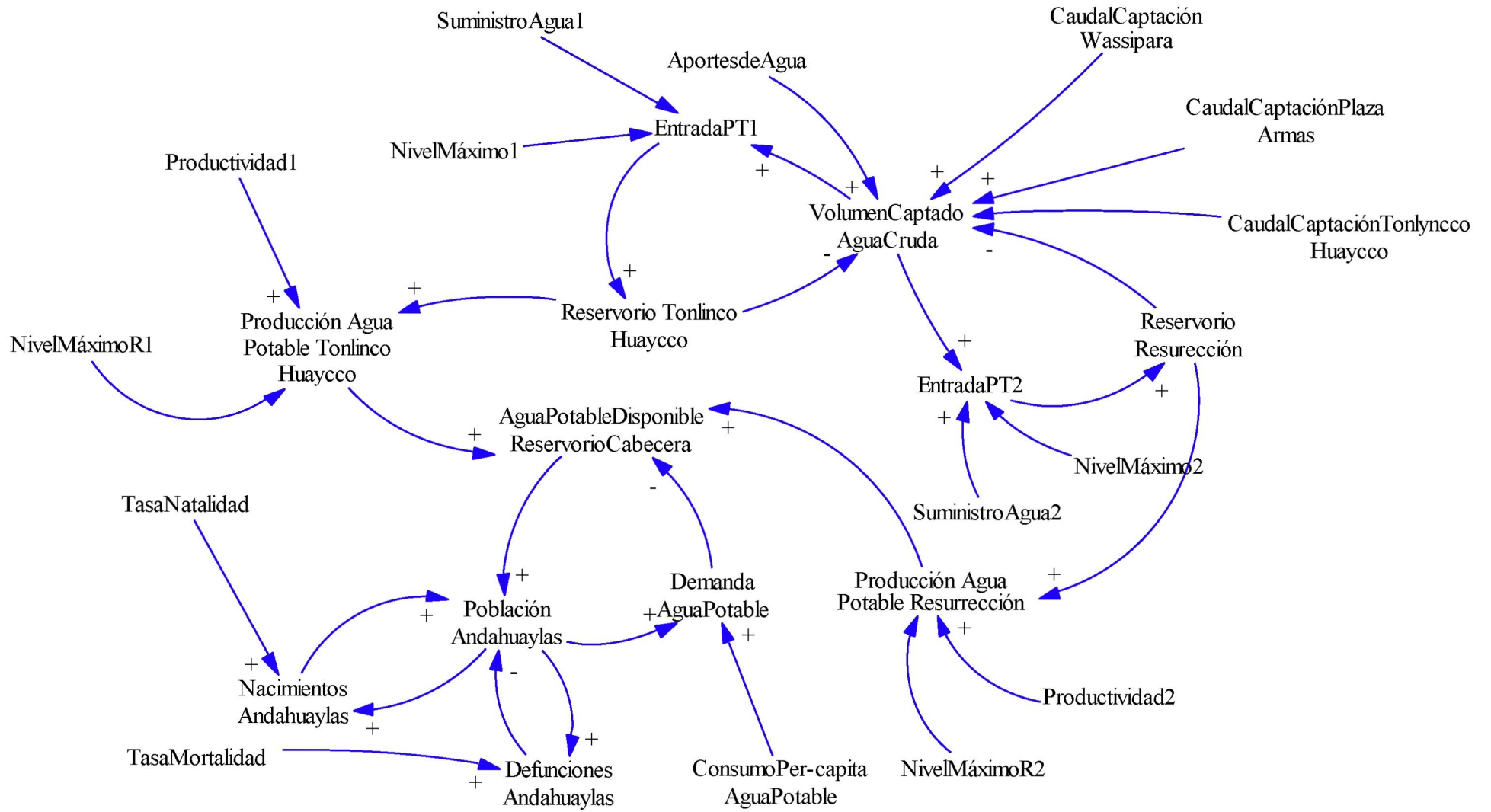
**NivelMáximoR1.**- Es la cantidad de agua que el reservorio de cabecera puede almacenar para evitar reboses, suministrado por el reservorio Tonlinco Huaycco.

**NivelMáximoR2.**- Es la cantidad de agua que el reservorio de cabecera puede almacenar para evitar reboses, suministrado por el reservorio Resurrección.

**Aportes de agua.**-Es el caudal total captado de las fuentes de Tonlinco Huaycco, Wassipara y Plaza de Armas.

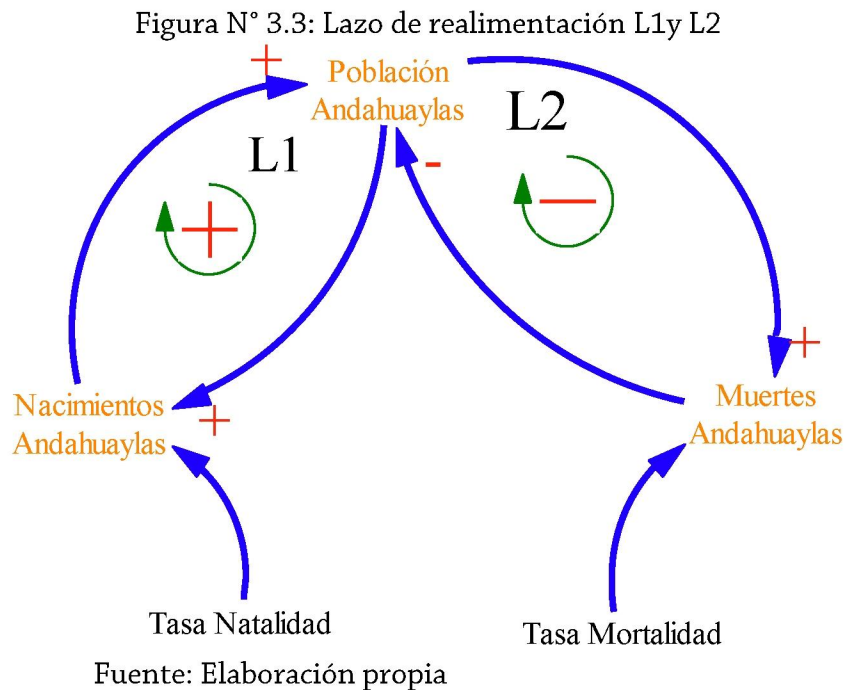
### **3.2.7 GRÁFICO DEL DIAGRAMA CAUSAL**

Figura N° 3.2: Diagrama causal para la predicción del abastecimiento del agua potable ciudad de Andahuaylas



### 3.2.8 LAZOS DE REALIMENTACIÓN IDENTIFICADOS

#### LAZOS DE REALIMENTACIÓN L1 Y L2



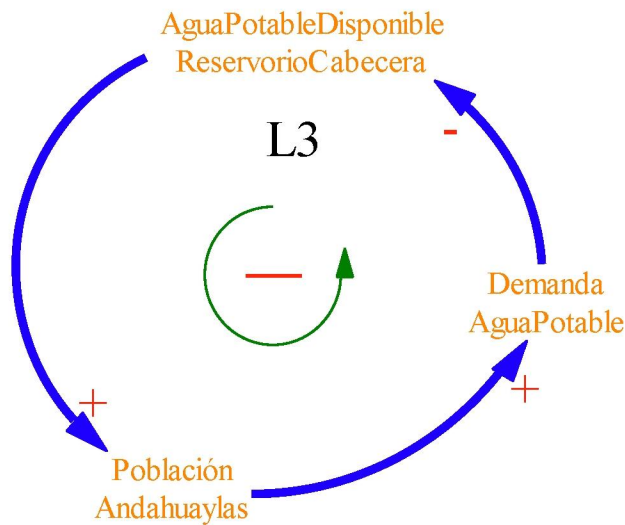
En la figura observamos dos bucles de realimentación en la que comparten una variable (Población Andahuaylas) y relaciones de causalidad. En el bucle de realimentación positiva (L1) la variable Nacimientos Andahuaylas influye en que aumente la variable Población Andahuaylas y que la variación de estas variables se propaga a lo largo del bucle reforzando dicha variable inicial y generando un comportamiento de crecimiento o el efecto de bola de nieve. En el bucle de realimentación negativa (L2) se observa que una variación de un elemento se transmite a lo largo del bucle de manera que se genera un efecto que contrarresta la variación inicial de esta manera estabilizando al bucle.

De acuerdo con el bucle de realimentación positiva (L1) en el que el proceso dinámico se traslada por una cadena de causas y efectos a través de un conjunto de variables que

acaba volviendo a la causa original de esta manera reforzando el estado inicial de la variable, tiende a desestabilizar el sistema de forma exponencial y que encontramos un comportamiento que hace que crezca el sistema de forma exponencial formando un círculo vicioso.

### LAZO DE REALIMENTACIÓN L3

Figura N° 3.4: Lazo de realimentación L3

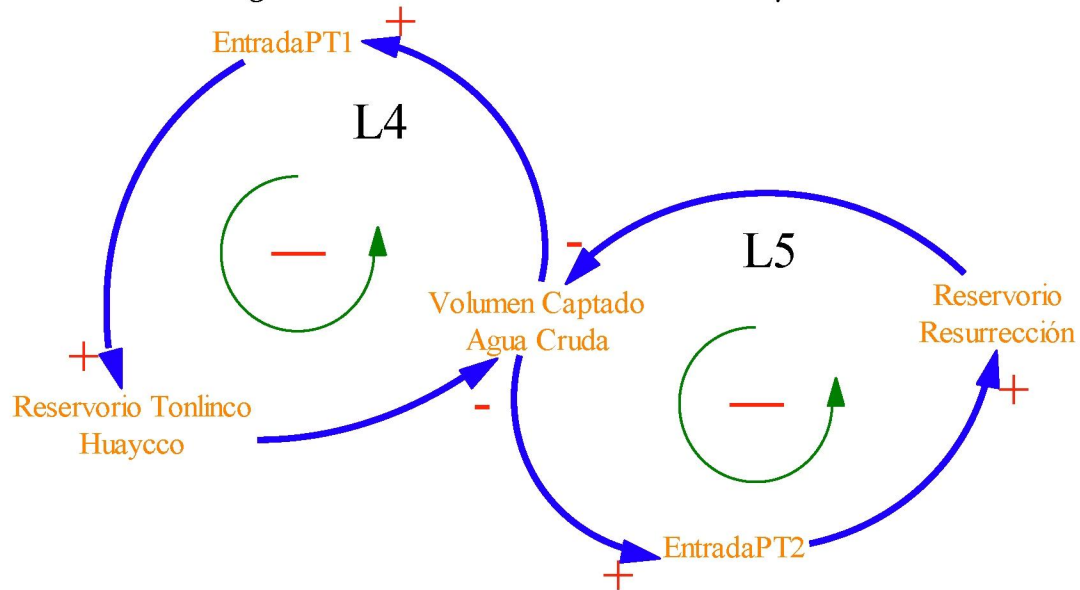


Fuente: Elaboración propia

Un aumento en la población hace que se incremente la demanda por agua potable, este aumento en la demanda a su vez hace que el agua potable disponible en el reservorio de cabecera disminuya, a mayor agua potable disponible en el reservorio de cabecera hace que aumente la población debido a la calidad de vida que tendrá la población.

## LAZOS DE REALIMENTACIÓN L4 Y L5

Figura N° 3.5: Lazos de realimentación L4 y L5



Fuente: Elaboración propia

En la figura observamos dos bucles de realimentación en la que comparten una variable (*VolumenCaptadoAguaCruda*) y relaciones de causalidad. En el bucle de realimentación L4 a mayor volumen captado de agua cruda se tendrá mayor flujo de agua en la entrada para abastecer el reservorio Tonlinco Huaycco y que a mayor volumen de agua almacenado en el reservorio Tonlinco Huaycco hará que disminuya el volumen captado, este bucle negativo estabilizará el nivel de flujo de agua en los reservorios tanto de captación y almacenamiento. El análisis en el bucle de realimentación L5 es lo mismo que en el análisis del bucle de realimentación L4.

### 3.3 DIAGRAMA DE FORRESTER

#### 3.3.1 LISTA DE VARIABLES DE FLUJO

##### A. VARIABLES DE FLUJO DE ENTRADA

1. Aportes Agua
2. Nacimientos Andahuaylas
3. EntradaPT1
4. EntradaPT2

## **B. VARIABLES DE FLUJO DE SALIDA**

1. Defunciones Andahuaylas
2. DemandaPoblacionalAguaPotable
3. ProducciónAguaPotable Tonlinco Huaycco
4. ProducciónAguaPotable Resurrección

### **3.3.2 LISTA DE VARIABLES DE NIVEL**

1. VolumenAguaPotableReservorioCabecera
2. VolumenCaptadoAguaCruda
3. PoblaciónAndahuaylas
4. Reservorio Tonlinco Huaycco
5. Reservorio Resurrección

### **3.3.3 LISTA DE VARIABLES AUXILIARES**

1. Tasa de natalidad
2. Tasa de Mortalidad
3. Fuente captación Wassipara
4. Fuente captación Tonlinco Huaycco
5. Fuente captación Plaza de Armas
6. SuministroAgua1
7. SuministroAgua2
8. NivelMáximo1
9. NivelMáximo2
10. Productividad1
11. Productividad2
12. NivelMáximorR1
13. NivelMáximorR2

### **3.3.4 VARIABLES RELACIONADOS**

La relación entre las variables se realizó en el diagrama causal de la Figura N° 3.2.

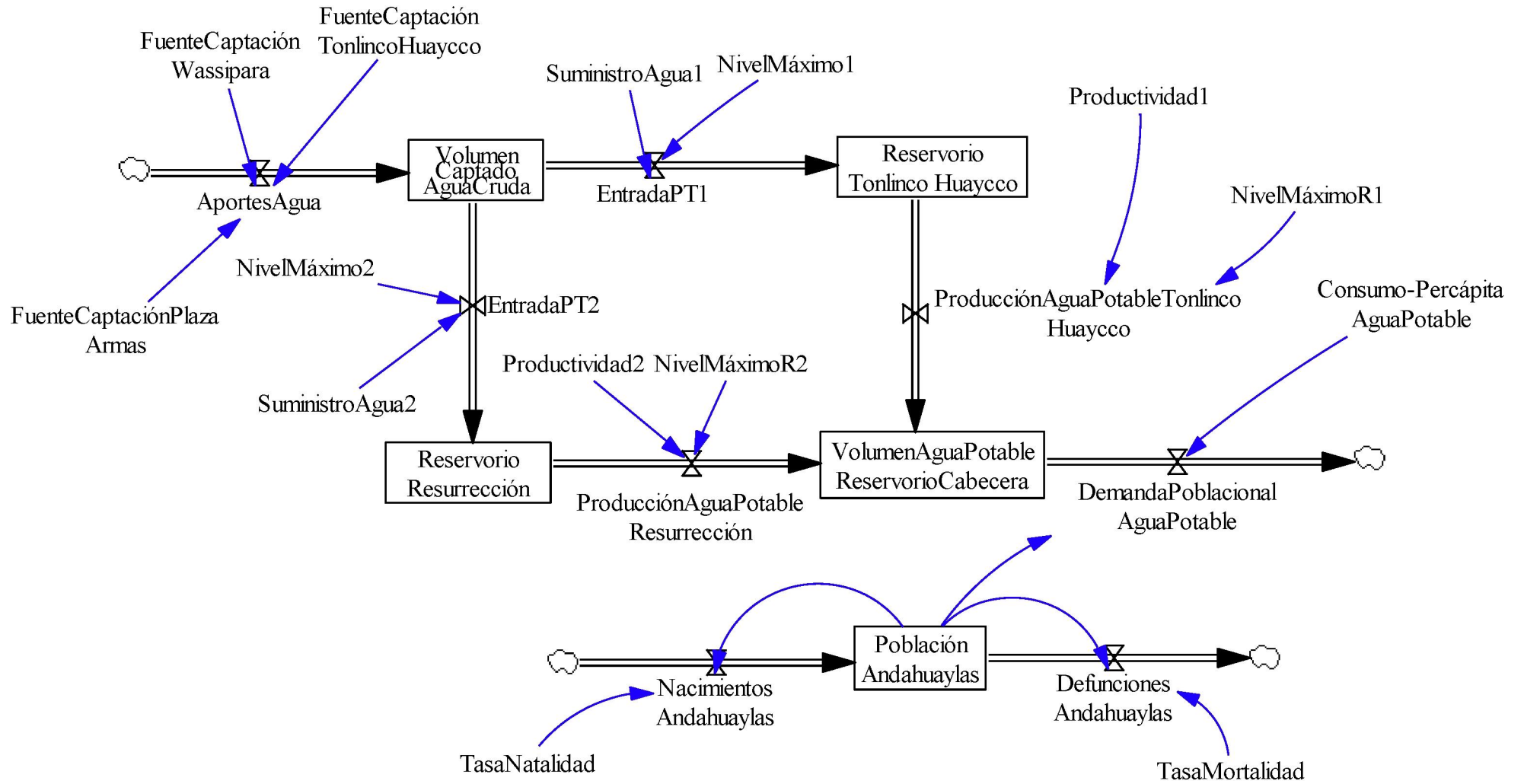
### **3.3.5 VARIABLES ASIGNADOS CON SUS VALORES**

La asignación de valores se muestra en las ecuaciones del modelo en la sección

3.4.2.

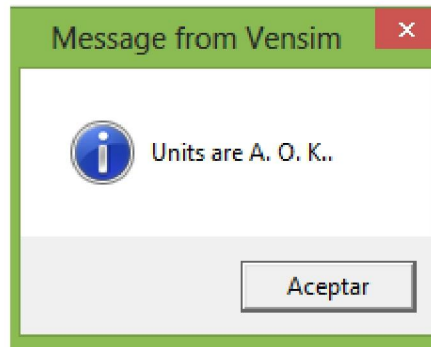
### **3.3.6 GRÁFICO DEL DIAGRAMA DE FORRESTER**

Figura N° 3.6: Diagrama de Forrester



### 3.4 VALIDACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL MODELO

#### 3.4.1 COHERENCIA DE LAS UNIDADES DE LAS VARIABLES COMPROBADAS



#### 3.4.2 ECUACIONES DEL MODELO

(01)  $AportesAgua = FuenteCaptaciónPlazaArmas + FuenteCaptaciónWassipara + FuenteCaptaciónTonlincoHuaycco$

Units: m<sup>3</sup>/Month

(02) "Consumo-PercápitaAguaPotable" =

0.167

Units: m<sup>3</sup>/(Month\*personas) [0,200,0.5]

(03)  $DefuncionesAndahuaylas = PoblaciónAndahuaylas * TasaMortalidad$

Units: personas/Year

(04)  $DemandaPoblacionalAguaPotable = PoblaciónAndahuaylas * "Consumo-PercápitaAguaPotable"$

Units: m<sup>3</sup>/Month

(05)  $EntradaPT1 = NivelMáximo1 * SuministroAgua1$

Units: m<sup>3</sup>/Month

(06)  $EntradaPT2 = NivelMáximo2 * SuministroAgua2$

Units: m<sup>3</sup>/Month

(07) FINAL TIME = 2050

Units: Year

The final time for the simulation.

(08)  $FuenteCaptaciónTonlincoHuaycco = 1836$

Units: m<sup>3</sup>/Month

(09)  $FuenteCaptaciónPlazaArmas = 11064$

Units: m<sup>3</sup>/Month

- (10) FuenteCaptaciónWassipara=100796  
Units: m<sup>3</sup>/Month
- (11) INITIAL TIME = 2013  
Units: Year  
The initial time for the simulation.
- (12) NacimientosAndahuaylas= TasaNatalidad\*PoblaciónAndahuaylas  
Units: personas/Year
- (13) NivelMáximo1= 1  
Units: 1/Month
- (14) NivelMáximo2= 1  
Units: 1/Month
- (15) NivelMáximoR1= 1  
Units: 1/Month
- (16) NivelMáximoR2=1  
Units: 1/Month
- (17) PoblaciónAndahuaylas= INTEG (  
+NacimientosAndahuaylas-DefuncionesAndahuaylas,  
73099)  
Units: personas
- (18) ProducciónAguaPotable Resurrección= NivelMáximoR2\*Productividad2  
Units: m<sup>3</sup>/Month
- (19) ProducciónAguaPotable Tonlinco Huaycco= NivelMáximoR1\*Productividad1  
Units: m<sup>3</sup>/Month
- (20) Productividad1=560956  
Units: m<sup>3</sup>
- (21) Productividad2=603617  
Units: m<sup>3</sup>
- (22) Reservorio Resurrección= +EntradaPT2-ProducciónAguaPotable Resurrección  
Units: m<sup>3</sup>/Month
- (23) Reservorio Tonlinco Huaycco= +EntradaPT1-ProducciónAguaPotable Tonlinco  
Huaycco  
Units: m<sup>3</sup>/Month
- (24) SuministroAgua1= 5388  
Units: m<sup>3</sup>

- (25) SuministroAgua2= 6341  
Units: m3
- (26) TasaMortalidad= 0.005  
Units: 1/Year
- (27) TasaNatalidad=0.02  
Units: 1/Year
- (29) TIME STEP = 1
- (30) VolumenAguaPotableReservorioCabecera=(ProducciónAguaPotable Tonlinco  
Huaycco+ProducciónAguaPotableResurrección)(DemandaPoblacionalAguaPotable)  
Units: m3/Month
- (31) VolumenCaptadoAguaCruda= AportesAgua-(EntradaPT1+EntradaPT2)  
Units: m3/Month

### 3.4.3 TABLAS DE VALIDACIÓN DEL MODELO (2013-2017)

Tabla N° 3.1: Simulación de la demografía poblacional

Demografía Poblacional Andahuaylas					
Time (Year)	2013	2014	2015	2016	2017
PoblaciónAndahuaylas	73,099	74,195	75,308	76,438	77,584
NacimientosAndahuaylas	1,461	1,483	1,506	1,528	1,551
DefuncionesAndahuaylas	365.49	370.97	376.54	382.19	387.92

Fuente: Resultados de la investigación

Tabla N° 3.2: Comparación de datos históricos con datos simulados para la demografía poblacional

Año	POBLACIÓN(Persona)			NACIMIENTOS(Persona/año)			DEFUNCIONES(Persona/año)		
	Histórico	Simulado	Error(%)	Histórico	Simulado	Error(%)	Histórico	Simulado	Error(%)
2013	73099	73099	0.00	1425	1461.98	2.60	369	365.50	0.95
2014	75299	74195.5	1.47	1452	1483.91	2.20	373	370.98	0.54
2015	76011	75308.4	0.92	1503	1506.17	0.21	379	376.54	0.65
2016	77025	76438	0.76	1578	1528.76	3.12	401	382.19	4.69
2017	80789	77584.6	3.97	1526	1551.69	1.68	408	387.92	4.92

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.3: Resultado de la simulación demanda por agua potable (m3/mes)

Población-Demanda Andahuaylas					
Time (Year)	2013	2014	2015	2016	2017
DemandaPoblacionalAguaPotable	12,207	12,390	12,576	12,765	12,956

Fuente: Resultados de la investigación

Tabla N° 3.4: Comparación de datos históricos con datos simulados para la demanda poblacional por agua potable

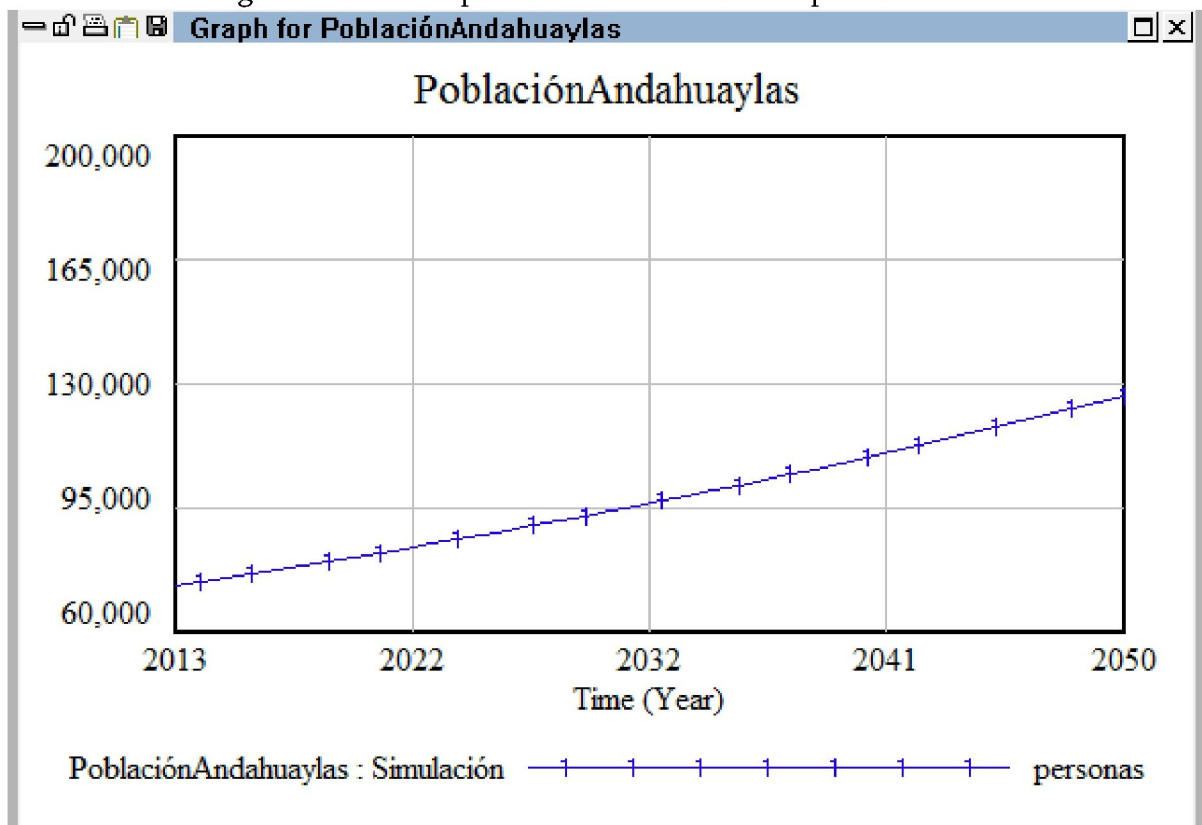
<b>DEMANDA POBLACIONAL POR AGUA POTABLE(m3/mes)</b>			
<b>Año</b>	<b>Histórico</b>	<b>Simulado</b>	<b>Error(%)</b>
2013	12369	12207	1.31
2014	12046	12390	2.86
2015	12425	12576	1.22
2016	12754	12765	0.09
2017	13095	12956	1.06

Fuente: Elaboración propia

### 3.5 SIMULACIÓN DEL MODELO

#### 3.5.1 GRÁFICOS Y TABLAS DEL MODELO (2013-2050)

Figura N° 3.7: Comportamiento de la variable población



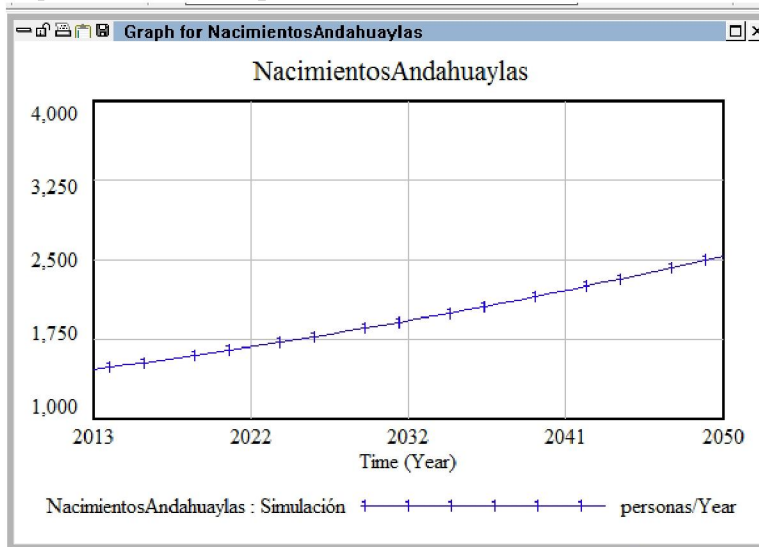
Fuente: Resultados de la investigación

Tabla N° 3.5: Proyección de la variable población

Time (Year)	"Población Andahuaylas"	PoblaciónAndahuaylas
2013		73099
2014	Runs:	74195.5
2015	Simulación	75308.4
2016		76438
2017		77584.6
2018		78748.4
2019		79929.6
2020		81128.5
2021		82345.5
2022		83580.7
2023		84834.4
2024		86106.9
2025		87398.5
2026		88709.5
2027		90040.1
2028		91390.7
2029		92761.6
2030		94153
2031		95565.3
2032		96998.8
2033		98453.7
2034		99930.5
2035		101430
2036		102951
2037		104495
2038		106063
2039		107654
2040		109268
2041		110907
2042		112571
2043		114260
2044		115973
2045		117713
2046		119479
2047		121271
2048		123090
2049		124936
2050		126810

Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 3.8: Comportamiento de la variable nacimientos



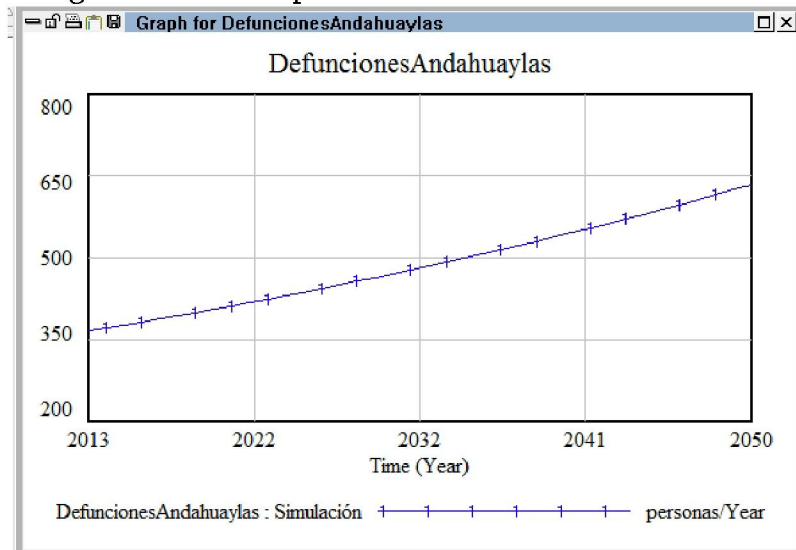
Fuente: Resultados de la investigación

Tabla N° 3.6: Proyección de la variable nacimientos

Time (Year)	"Nacimientos Andahuaylas"	NacimientosAndahuaylas
2013	Andahuaylas"	1461.98
2014	Runs:	1483.91
2015	Simulación	1506.17
2016		1528.76
2017		1551.69
2018		1574.97
2019		1598.59
2020		1622.57
2021		1646.91
2022		1671.61
2023		1696.69
2024		1722.14
2025		1747.97
2026		1774.19
2027		1800.8
2028		1827.81
2029		1855.23
2030		1883.06
2031		1911.31
2032		1939.98
2033		1969.07
2034		1998.61
2035		2028.59
2036		2059.02
2037		2089.9
2038		2121.25
2039		2153.07
2040		2185.37
2041		2218.15
2042		2251.42
2043		2285.19
2044		2319.47
2045		2354.26
2046		2389.58
2047		2425.42
2048		2461.8
2049		2498.73
2050		2536.21

Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 3.9: Comportamiento de la variable defunciones



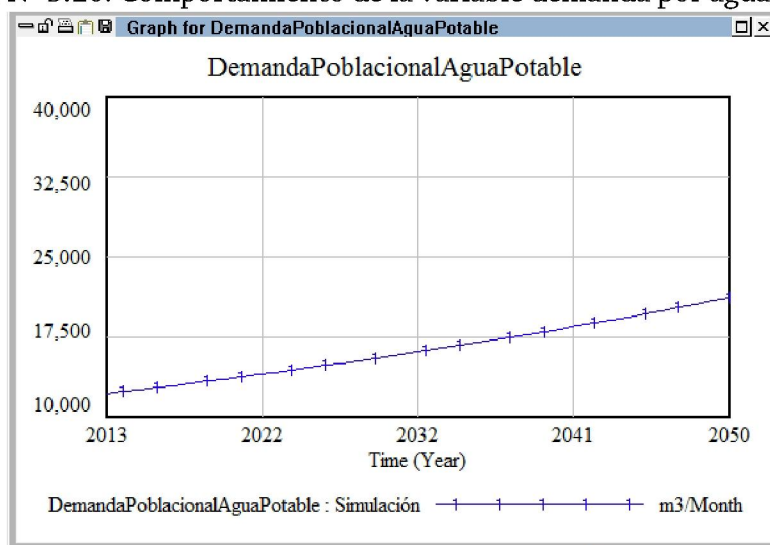
Fuente: Resultados de la investigación

Tabla N° 3.7: Proyección de la variable defunciones

Time (Year)	"Defunciones Andahuaylas"	DefuncionesAndahuayla
2013	Andahuaylas	365.495
2014	Runs:	370.977
2015	Simulación	376.542
2016		382.19
2017		387.923
2018		393.742
2019		399.648
2020		405.643
2021		411.727
2022		417.903
2023		424.172
2024		430.534
2025		436.992
2026		443.547
2027		450.201
2028		456.953
2029		463.808
2030		470.765
2031		477.826
2032		484.994
2033		492.269
2034		499.653
2035		507.148
2036		514.755
2037		522.476
2038		530.313
2039		538.268
2040		546.342
2041		554.537
2042		562.855
2043		571.298
2044		579.867
2045		588.565
2046		597.394
2047		606.355
2048		615.45
2049		624.682
2050		634.052

Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 3.10: Comportamiento de la variable demanda por agua potable



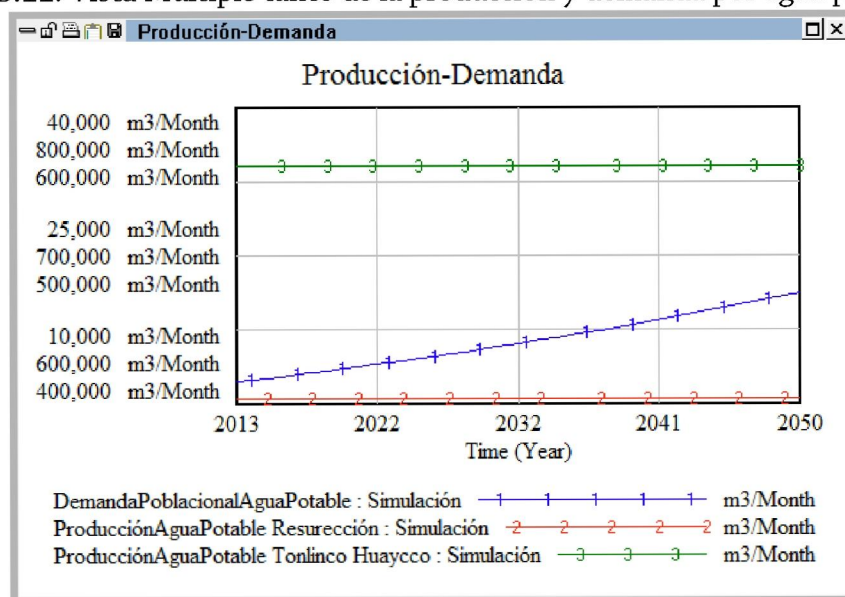
Fuente: Resultados de la investigación

Tabla N° 3.8: Proyección de la variable demanda por agua potable

Time (Year)	"Demanda Poblacional AguaPotable"	DemandaPoblacionalAg
2013	Poblacional	12207.5
2014	AguaPotable"	12390.6
2015	Runs:	12576.5
2016	Simulación	12765.2
2017		12956.6
2018		13151
2019		13348.2
2020		13548.5
2021		13751.7
2022		13958
2023		14167.3
2024		14379.8
2025		14595.5
2026		14814.5
2027		15036.7
2028		15262.2
2029		15491.2
2030		15723.5
2031		15959.4
2032		16198.8
2033		16441.8
2034		16688.4
2035		16938.7
2036		17192.8
2037		17450.7
2038		17712.5
2039		17978.1
2040		18247.8
2041		18521.5
2042		18799.4
2043		19081.3
2044		19367.6
2045		19658.1
2046		19953
2047		20252.2
2048		20556
2049		20864.4
2050		21177.3

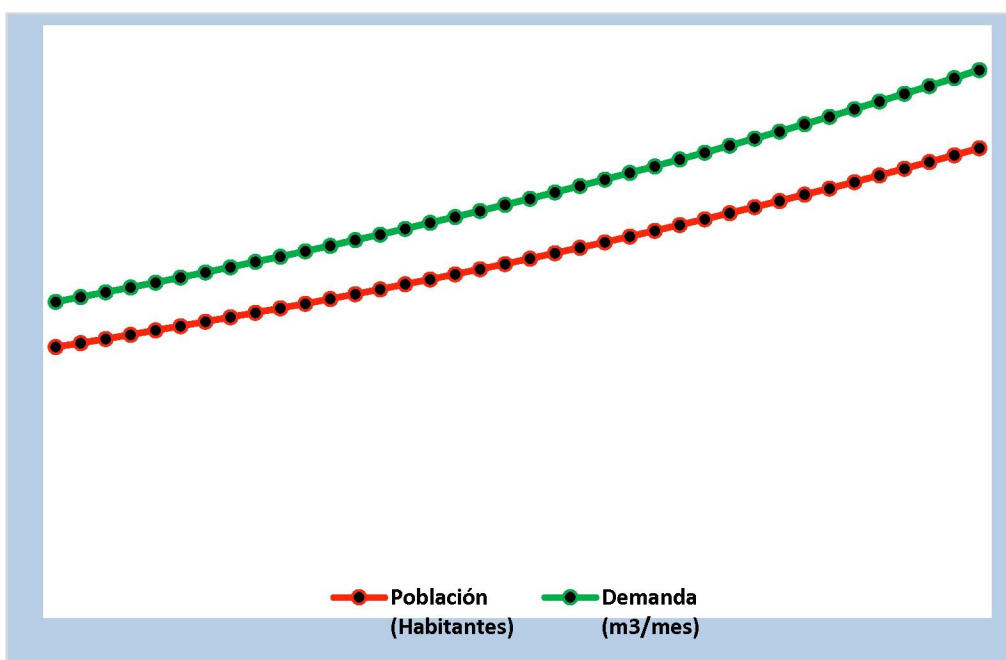
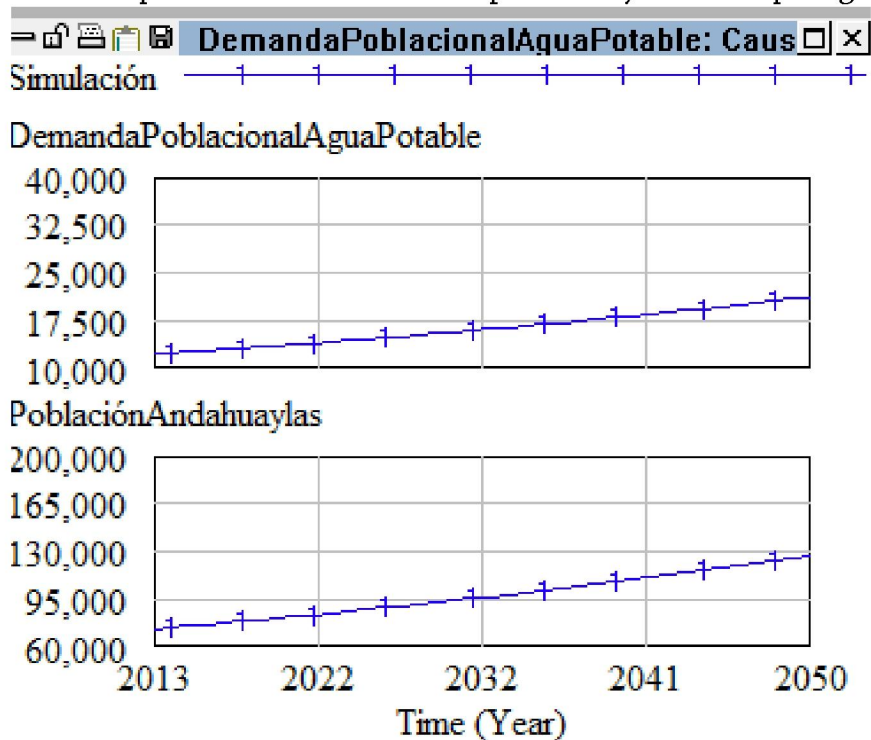
Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 3.11: Vista Múltiple tanto de la producción y demanda por agua potable



Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 3.12: Comportamiento de la variable población y demanda por agua potable



Fuente: Resultados de la investigación y elaboración propia

### 3.5.2 PROYECCIONES A PARTIR DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO (2013-2050)

Tabla N° 3.9: Proyección de la población y producción de agua potable al 2050

<b>AÑO</b>	<b>Población (persona)</b>	<b>Producción (m3/mes)</b>	<b>Producción Per Cápita (m3/persona/mes)</b>
2013	73099	1164573.00	15.93
2014	74196	1164573.00	15.70
2015	75308	1164573.00	15.46
2016	76438	1164573.00	15.24
2017	77585	1164573.00	15.01
2018	78748	1164573.00	14.79
2019	79930	1164573.00	14.57
2020	81129	1164573.00	14.35
2021	82346	1164573.00	14.14
2022	83581	1164573.00	13.93
2023	84834	1164573.00	13.73
2024	86107	1164573.00	13.52
2025	87399	1164573.00	13.32
2026	88710	1164573.00	13.13
2027	90040	1164573.00	12.93
2028	91391	1164573.00	12.74
2029	92762	1164573.00	12.55
2030	94153	1164573.00	12.37
2031	95565	1164573.00	12.19
2032	96999	1164573.00	12.01
2033	98454	1164573.00	11.83
2034	99931	1164573.00	11.65
2035	101430	1164573.00	11.48
2036	102951	1164573.00	11.31
2037	104495	1164573.00	11.14
2038	106063	1164573.00	10.98
2039	107654	1164573.00	10.82
2040	109268	1164573.00	10.66
2041	110907	1164573.00	10.50
2042	112571	1164573.00	10.35
2043	114260	1164573.00	10.19
2044	115973	1164573.00	10.04
2045	117713	1164573.00	9.89
2046	119479	1164573.00	9.75
2047	121271	1164573.00	9.60
2048	123090	1164573.00	9.46
2049	124936	1164573.00	9.32
2050	126810	1164573.00	9.18

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3 ESCENARIOS PROPUESTOS Y EVALUADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Tabla N° 3.10: Escenarios propuestos

ESCENARIO	CLASE	DESCRIPCIÓN
1	Cambio climático	Captación se reduce en 20%
2	Reducción de tasa de natalidad	La tasa de natalidad se reduce de 2% a 1.5%

Fuente: Elaboración propia

#### 3.5.3.1 ESCENARIO 1: Captación de agua se reduce en 20%

Tabla N° 3.11: Producción de agua potable al 2050

AÑO	Población (persona)	Producción (m3/mes)	Producción Per Cápita (m3/persona/mes)
2013	73099	931659.00	12.75
2014	74196	931659.00	12.56
2015	75308	931659.00	12.37
2016	76438	931659.00	12.19
2017	77585	931659.00	12.01
2018	78748	931659.00	11.83
2019	79930	931659.00	11.66
2020	81129	931659.00	11.48
2021	82346	931659.00	11.31
2022	83581	931659.00	11.15
2023	84834	931659.00	10.98
2024	86107	931659.00	10.82
2025	87399	931659.00	10.66
2026	88710	931659.00	10.50
2027	90040	931659.00	10.35
2028	91391	931659.00	10.19
2029	92762	931659.00	10.04
2030	94153	931659.00	9.90
2031	95565	931659.00	9.75
2032	96999	931659.00	9.60
2033	98454	931659.00	9.46
2034	99931	931659.00	9.32
2035	101430	931659.00	9.19
2036	102951	931659.00	9.05
2037	104495	931659.00	8.92
2038	106063	931659.00	8.78
2039	107654	931659.00	8.65
2040	109268	931659.00	8.53
2041	110907	931659.00	8.40
2042	112571	931659.00	8.28
2043	114260	931659.00	8.15
2044	115973	931659.00	8.03
2045	117713	931659.00	7.91
2046	119479	931659.00	7.80
2047	121271	931659.00	7.68
2048	123090	931659.00	7.57
2049	124936	931659.00	7.46
2050	126810	931659.00	7.35

Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3.2 ESCENARIO 2: La tasa de natalidad se reduce de 2 a 1.5%

Tabla N° 3.12: Proyección de la variable demanda por agua potable

Time (Year)	"Demanda Poblacional Agua Potable"	Demanda Poblacional Agua Potable
2013	Poblacional	12207.5
2014	Agua Potable"	12329.6
2015	Runs:	12452.9
2016	Simulación	12577.4
2017		12703.2
2018		12830.2
2019		12958.5
2020		13088.1
2021		13219
2022		13351.2
2023		13484.7
2024		13619.6
2025		13755.8
2026		13893.3
2027		14032.2
2028		14172.6
2029		14314.3
2030		14457.4
2031		14602
2032		14748
2033		14895.5
2034		15044.5
2035		15194.9
2036		15346.9
2037		15500.3
2038		15655.3
2039		15811.9
2040		15970
2041		16129.7
2042		16291
2043		16453.9
2044		16618.4
2045		16784.6
2046		16952.5
2047		17122
2048		17293.2
2049		17466.2
2050		17640.8

Fuente: Resultados de la investigación

## **CAPITULO IV**

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Los modelos de simulación dinámica, permiten efectuar descripciones abstractas de la realidad, posibilitando la representación de problemas complejos, caracterizados por ser dinámicos, no lineales, donde existen relaciones de retroalimentación y desfases temporales y espaciales. El objetivo de las simulaciones de modelos es hacer evidentes las presuposiciones efectuadas a cerca de los mismos.

Es importante que el comportamiento real de un sistema sea producido por el modelo, sin embargo como sostiene Grcic y Munitic (2000), al elaborar un modelo, algunas características de la dinámica del mismo no son cuantificables, por lo que se utilizan datos cualitativos y empíricos, perdiéndose entonces la eficacia de los testes de validación cuantitativa. De lo derivado anteriormente expuesto, surge la necesidad, de efectuar una validación cualitativa del modelo, buscando con ello establecer de manera prioritaria, si éste es útil para el objetivo propuesto, tal como lo sostiene Ford (1999).

Para Sterman (2000), los modelos no representan la realidad, por lo que no se puede constatar su veracidad, todos son susceptibles de ser falsificados o refutados de acuerdo a algunos testes o teorías. Lo importante es entonces, seleccionar el modelo que de mejor manera alcanza determinado objetivo. En este contexto se torna prioritario identificar de forma clara y precisa el problema a ser estudiado y contextualizarlo a fin de especificar sus objetivos reales.

Según Forrester (1961), en la dinámica de sistemas, la validación de los modelos de simulación se juzga de acuerdo a su conveniencia y utilidad. Se debe confiar en su comportamiento bajo condiciones limitadas y de acuerdo a un objetivo en particular.

El modelo de simulación dinámica debe de capturar solamente los factores esenciales de un sistema real, debiéndose abstraer los factores restantes. Su validación debe de ser considerada de acuerdo a la consistencia lógica de su estructura interna. (Ruth, Hannon, 1994).

En este estudio se ha realizado el modelo de simulación para predecir el abastecimiento de agua potable en la ciudad de Andahuaylas, a fin de examinar si este recurso seguirá abasteciendo de manera regular en el futuro. Este sistema está constituido por un conjunto de elementos organizados alrededor del objetivo de captación, potabilización y distribución del agua para la población. Para poder construir el sistema, se identificaron prioritariamente los elementos clave que lo conforman y se utilizaron los procedimientos antes citado.

El proceso de validación de un modelo de dinámica de sistemas, tiene como objetivo fundamental establecer la validez estructural del modelo con respecto a los objetivos para el que fue construido. Este aspecto es determinante, pues el propósito de un estudio efectuado bajo la óptica de la dinámica de sistemas es servir de base para la evaluación de diferentes estrategias y políticas que permitan mejorar el desempeño del sistema. Perfeccionar el comportamiento de un sistema, solo tiene sentido si se tiene confianza en la estructura del modelo. Una vez que se ha construido el modelo de forma confiable, se deben efectuar testes de validación, cuyo énfasis debe de estar orientado prioritariamente a los patrones de predicción, más que ha resultados

precisos, en particular, cuando se trata de modelos diseñados para proporcionar una visión de largo plazo, del comportamiento de los sistemas en estudio (Barlas, 1996).

La validación en dinámica de sistemas es una práctica en cada etapa del modelaje, a fin de detectar fallas en los sistemas construidos.

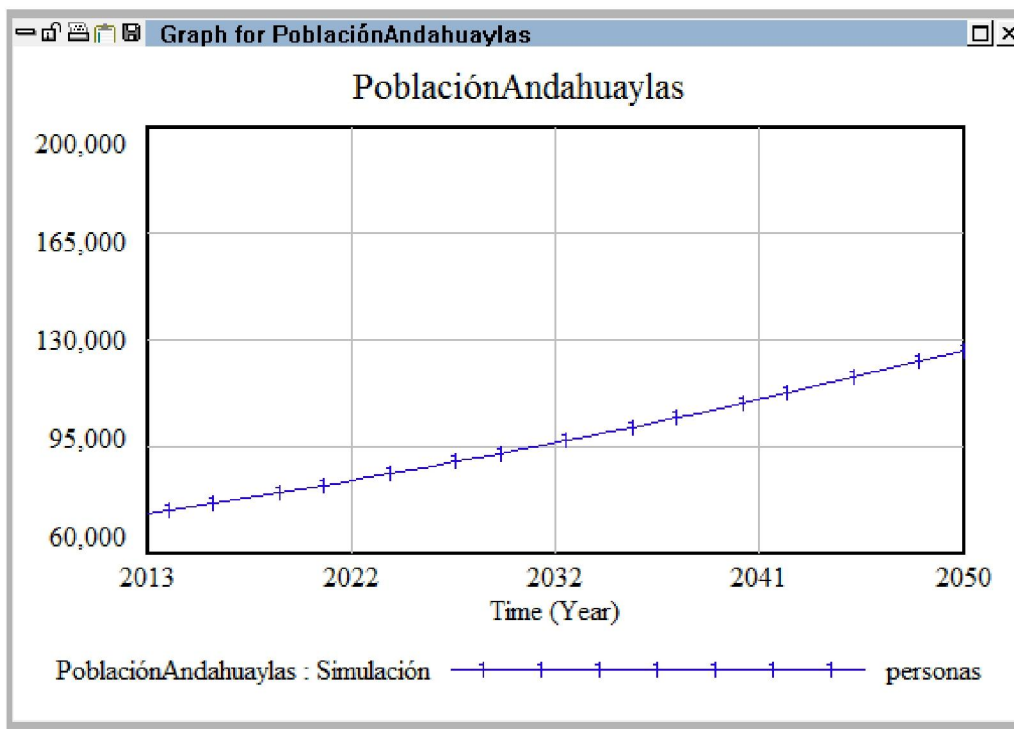
De acuerdo con Forrester y Senge (1980), y Barlas (1996), entre los procedimientos formales está la aplicación de testes orientados de comportamiento estructural. Entre los cuales se tiene los testes de análisis de sensibilidad.

Las figuras N° 4.1 y 4.2 comprenden los resultados de la calibración del modelo, a través de ciertos parámetros, para los cuales existen datos en el periodo 2013-2017. En esta simulación, la dinámica de crecimiento de la población humana son comparados con respecto a sus respectivos datos históricos, el comportamiento del modelo corresponde de forma satisfactoria a los datos disponibles.

Es importante señalar que ningún modelo puede ser validado al 100%, pues se incluyen variables que no pueden ser cuantificadas, y también se hacen suposiciones acerca del comportamiento esperado de los parámetros, que muchas veces pueden diferir de lo que sucede en la realidad.

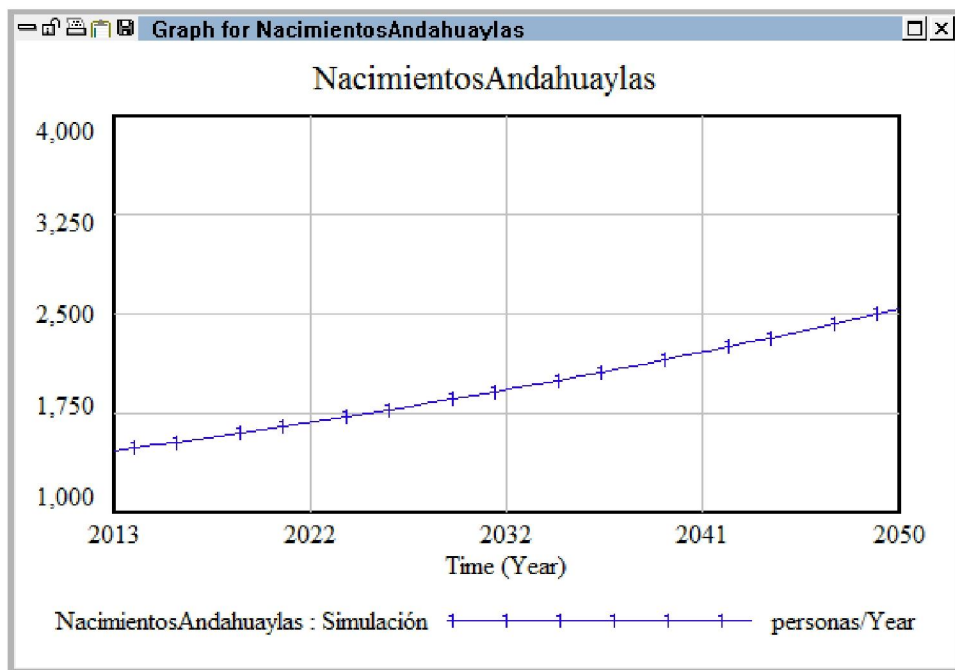
La escala temporal del modelo ha sido determinada de acuerdo a la naturaleza del problema, y al objetivo en base al cual ha sido desarrollado el mismo.

Figura N° 4.1: Comportamiento de la variable población 2013-2017



Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 4.2: Comportamiento de la variable nacimientos 2013-2017



Fuente: Resultados de la investigación

El proceso de simulación del modelo comprendió diferentes escenarios de producción y demanda de agua potable, de acuerdo a las siguientes especificaciones:

- a) Horizonte temporal: se propuso un horizonte de 38 simulaciones. Cada simulación se caracterizó por unidad/año lo que hace un horizonte de tiempo de 38 años.
- b) Paso de tiempo o step: el paso de tiempo fue de una unidad (1 año).
- c) Método de integración: se emplearon ecuaciones diferenciales para describir las complejas relaciones en la dinámica de sistemas, las que son resueltas a través del método Euler, que es el más frecuentemente utilizado, y está caracterizado por la adopción de un flujo constante durante un paso de tiempo o step (Stella, 2001).

En este trabajo se han analizado 2 escenarios de producción y demanda de agua potable, los mismos se describen en la Tabla N° 3.10.

El escenario 1 “Cambio climático”, contempla la reducción en la captación de agua en un 20%, debido a cambios climáticos asumiéndose que el resto de componentes del modelo no presenta variaciones, el escenario 2 “Reducción de la tasa de natalidad”, muestra la disminución de tasa de natalidad de 2% a 1.5% debido a algunas políticas aplicadas al crecimiento poblacional en la ciudad de Andahuaylas.

La dinámica de sistemas es usada como una herramienta, que auxilia en el conocimiento de la situación existente y su posible futuro. Lo cual posibilita visualizar el comportamiento del sistema en estudio, a corto, mediano y largo plazo, identificándose así, aquellos elementos claves, que puedan servir como puntos de apoyo, para la aplicación de políticas que permitan mejorar el sistema, lo que ayuda en el proceso de planeación del abastecimiento de agua potable para la ciudad de Andahuaylas.

Esta metodología permite integrar en un solo modelo diferentes perspectivas del uso del agua, proporcionar datos sobre lo que acontece cuando simulamos la

implementación de una política, y también posibilita el manejo de variables físicas y sociales dentro del mismo modelo. La simulación con variables de este tipo, ayuda a determinar impactos tanto físicos como sociales resultantes de la implementación de políticas de largo plazo.

La dinámica de sistemas es un enfoque adecuado para modelar y simular el comportamiento de problemas de recursos hídricos en el tiempo, permitiendo además descomponer este en subproblemas, el modelo tiene la ventaja de proporcionar información cuantitativa, lo que permite analizar varios escenarios a fin de escoger la solución más adecuada.

Para Jaimes et al., (2016), la dinámica de sistemas es una metodología para el estudio y manejo de sistemas de realimentación complejos; el uso del software permite realizar simulaciones bajo diferentes tipos de escenarios, lo que ofrece la posibilidad de estudiar el comportamiento y las consecuencias de las múltiples interacciones de las variables.

Para Martínez et al., (2016), la modelación de sistemas es una metodología útil para la creación de modelos de simulación que permitan el diseño de escenarios, compuestos por diversas estrategias, y la valoración de sus resultados en el sistema; en última instancia, se muestra como una valiosa herramienta para los tomadores de decisiones del sistema.

Con base en lo que se mencionó anteriormente, se puede decir que la simulación, es una técnica que imita el funcionamiento de un sistema del mundo real, al crear un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema, expresándolo en relaciones matemáticas o lógicas.

La hipótesis se demostró comprobando el margen de error con los datos simulados y datos históricos. Los datos históricos se obtuvieron de la Tabla N° 3.2, Tabla N° 3.4 del capítulo N° 3 y los datos simulados se obtuvo de la simulación que se hizo y se muestra en la Tabla N° 3.1, Tabla N° 3.3. Asimismo a partir de la simulación se obtuvo las gráficas de la Figura N° 3.7, Figura N° 3.8 y Figura N° 3.9 que muestran el comportamiento de la variable población, nacimientos y defunciones, para calcular el margen de error de todas las variables del modelo se usó la siguiente fórmula:

$$\Delta = \frac{|\text{DatoSimulado} - \text{DatoHistórico}|}{\text{DatoHistórico}} * 100$$

Según los resultados de la simulación que se encuentran en la Tabla N° 3.2 y Tabla N° 3.4, en la cual podemos observar que el margen de error es < al 5%, por cuanto el modelo se concluye es confiable verificándose la hipótesis planteada.

El modelo desarrollado no representa la realidad absoluta, el modelador es una persona que trata de entender la posición de la realidad que representa, se puede creer que esa posición la ha entendido completamente. Un modelo es una representación que siempre puede ser mejorada (Sterman, 2000).

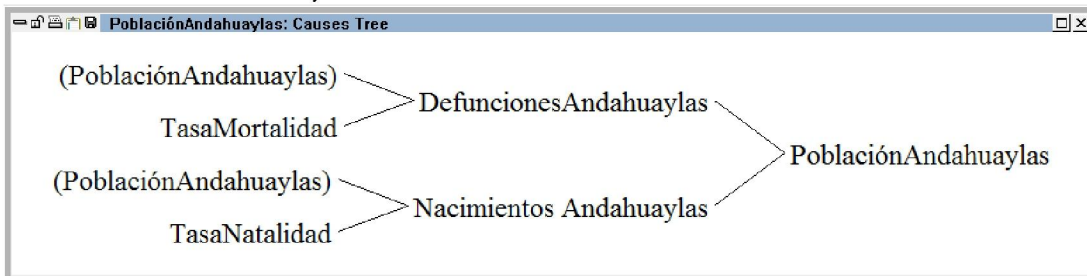
La herramienta de simulación VENSIM, permitió ver gráficamente las variables involucradas en el comportamiento del sistema de agua potable de la ciudad de Andahuaylas.

En el trabajo de investigación realizada se pudo demostrar que con dinámica de sistemas se pudo lograr un modelo que describe el ámbito de toma de decisiones, en dicho modelo fue posible describir las variables de flujos, las variables de nivel, las variables auxiliares y se pudieron proponer diferentes e hipotéticos escenarios donde

se puede analizar el comportamiento de las variables para tomar decisiones, por lo que se convierte en una herramienta de gestión del agua potable dada la necesidad del aseguramiento del desarrollo económico y social en cuanto al aprovisionamiento de agua potable para la ciudad de Andahuaylas.

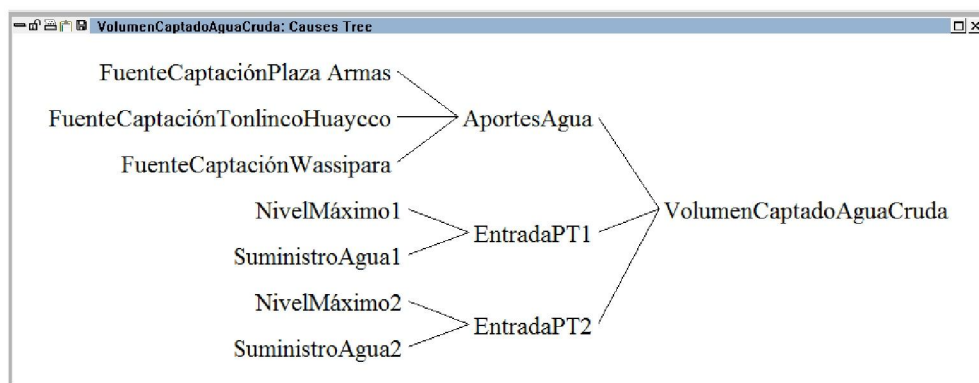
El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un modelo de simulación para predecir el abastecimiento del agua potable para la ciudad de Andahuaylas al 2050; para lo cual se ha elaborado el diagrama causal determinando variables e influencias entre las mismas, luego se determinó las variables relevantes y se elaboró el diagrama de Forrester. Se trabajó con un total de 27 variables: 5 variables de nivel, 8 variables de flujo y 14 variables auxiliares. Con dichas variables se identificó las influencias entre ellos:

Figura N° 4.3: Diagrama árbol de causas de la variable de nivel “Población Andahuaylas”



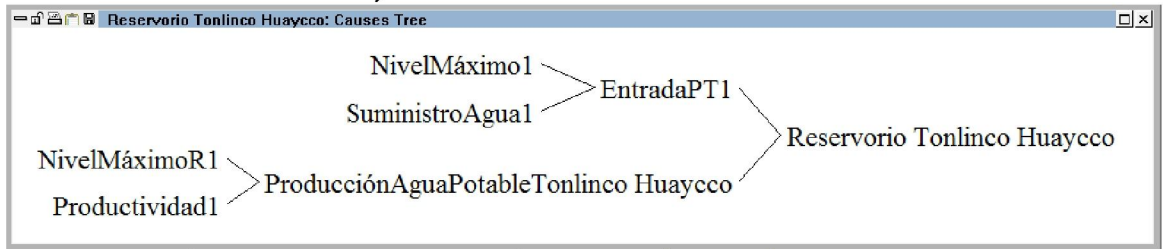
Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 4.4: Diagrama árbol de causas de la variable de nivel “Volumen Captado de Agua Cruda”



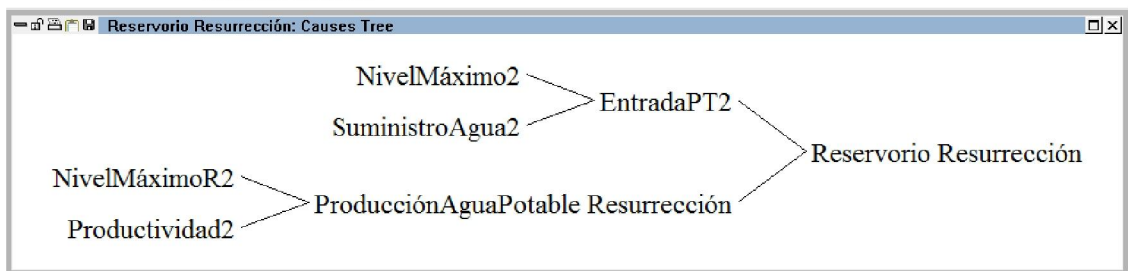
Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 4.5: Diagrama árbol de causas de la variable de nivel “Reservorio Tonlinco Huaycco”



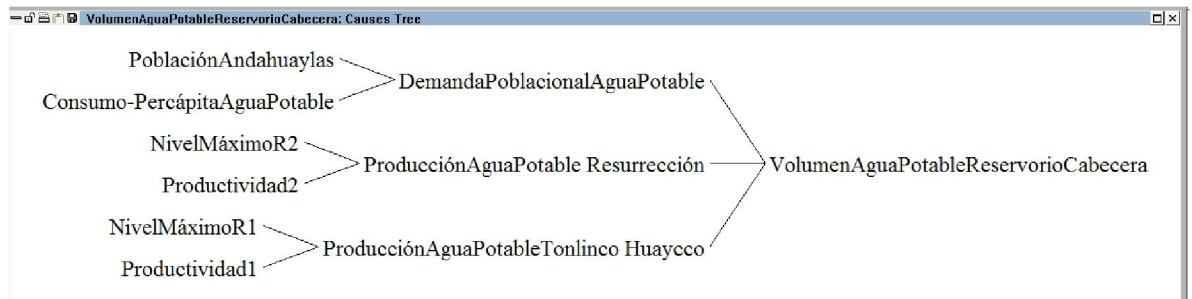
Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 4.6: Diagrama árbol de causas de la variable de nivel “Reservorio Resurrección”



Fuente: Resultados de la investigación

Figura N° 4.7: Diagrama árbol de causas de la variable de nivel “Volumen Agua Potable Reservorio Cabecera”



Fuente: Resultados de la investigación

Además se muestra una aproximación de tipo cualitativa y cuantitativamente de la realidad que permite observar las relaciones de variables, sus influencias en el tiempo y las limitaciones que se pueden generar si no se maneja información sobre alguna de ellas para explicar el comportamiento de otra variable inmersa en el modelo.

Contrastando el resultado, conclusiones y los antecedentes de la tesis coincidimos en que la metodología de dinámica de sistemas logra la integración de los componentes

como es en nuestro caso, determinando el comportamiento de las variables que conforman este sistema.

Y considerando el modelo planteado es posible realizar mayores aproximaciones a la realidad ya sea a mediante las simulaciones y manejo de escenarios considerando las diferentes variables como es captación de agua que ingresan a los reservorios de tratamiento e incluso las variaciones climáticas todo ello a fin de lograr una explicación en detalle de la realidad.

El proceso de construcción del modelo de simulación a través de la dinámica de sistemas y de simulación a través de él, para el sistema de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Andahuaylas, ha permitido a través de la integración de elementos básicos de su manejo, la observación de comportamientos probables en la disponibilidad del agua potable. Si bien es cierto que es prácticamente imposible integrar todos los elementos, con la relevancia o prioridad de acuerdo con su incidencia se logra realizar un filtro adecuado que deja observar falencias y puntos que podrían y deberían ser mejorados en el proceso administrativo y regulatorio del recurso agua.

Es posible que una conciencia masificada sobre el uso del recurso hídrico permita un uso eficiente del mismo, que permita hacer rendir la cantidad disponible de agua un poco más de lo que se espera con las condiciones actuales. De ser así, el límite será un poco más amplio pero seguirá existiendo. El vacío informacional en cuanto al impacto de las campañas que promueven el uso racional del agua, en el consumo de la población, deja espacios abiertos para evaluar esta alternativa dentro del sistema de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Andahuaylas.

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

- a. Se llegó a construir satisfactoriamente el diagrama causal del modelo de simulación para la predicción del abastecimiento de agua potable para la ciudad de Andahuaylas al 2050, según los lazos de realimentación se observa que la variable población tiene un crecimiento continuo por lo que la demanda del agua potable incrementará en el futuro, por lo que es necesario aplicar políticas a fin de que la población no siga incrementando geométricamente en el tiempo.

El análisis cualitativo y la simulación, específicamente con Dinámica de Sistemas, pueden lograr que las personas encargadas de la toma de decisiones en la gestión del agua potable y en toda clase de sistemas, tengan una mayor claridad sobre los efectos que pueden resultar del proceso de toma de decisiones; se consigue por lo tanto una mayor capacidad del pensamiento sistémico.

- b. A partir del diagrama causal se construyó el diagrama de Forrester del modelo de simulación para la predecir el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Andahuaylas al 2050.

Se simuló satisfactoriamente las variables producción y demanda del modelo de simulación para agua potable, también se simuló aplicando diversos escenarios como son el cambio climático, reducción de tasa natalidad.

Según las simulaciones realizadas se pronostica que para el año 2050 la ciudad de Andahuaylas contará con una población de 126,810 y demandará 21,177.30

m<sup>3</sup>/mes de agua potable, la producción de agua potable para el año 2050 será 9.18 m<sup>3</sup>/mes.

Según la simulación realizada se verifica que hay una disminución de la producción de agua potable cada año, en el año 2019 la producción es de 14.57 m<sup>3</sup>/mes y para el año 2050 solo será de 9.18 m<sup>3</sup>/mes (teniendo un decremento o brecha de 5.39 m<sup>3</sup>/mes entre estos años). Asimismo se puede observar que la demanda del agua potable para el 2019 es de 13,348.20 m<sup>3</sup>/mes y en el 2050 será de 21,177.30 m<sup>3</sup>/mes (teniendo un incremento o brecha de 7, 829.10 entre estos años).

Entonces se puede concluir que para el año 2050 el abastecimiento de agua potable disminuirá en comparación con el año 2019, debido a la reducción de la producción del agua potable y el incremento de la demanda del agua potable debido al crecimiento poblacional, lo cual traerá malestar a los pobladores de la ciudad de Andahuaylas. Por lo que es necesario aplicar políticas públicas a fin de incrementar la producción de agua potable (Captación de nuevas fuentes de agua: lagunas cercanas) y disminuir el crecimiento poblacional (reducción de la tasa de natalidad).

Tras realizar un estudio de los fundamentos teóricos de la Dinámica de Sistemas y seguir el desarrollo de esta metodología a lo largo del horizonte del tiempo de estudio (haciendo hincapié para la gestión del agua), se ha desarrollado el modelo de simulación creado mediante el programa de software Vensim, este modelo de simulación, el primero creado para la zona mediante esta metodología, simula la producción y demanda del agua potable a lo largo del tiempo en un horizonte de tiempo de 38 años.

Son muchas las posibilidades que abre este nuevo modelo de simulación, esto gracias a la capacidad integradora del conocimiento y los desarrollos obtenidos en

múltiples campos científicos que posee esta metodología. Este nuevo modelo podría ser un campo de pruebas para la simulación de futuras hipótesis de funcionamiento que incorporen elementos no solo del sistema de agua potable. Del mismo modo, este modelo presenta una buena capacidad de adaptación a los cambios que se puedan producir en la estructura del sistema y a los cambios en la gestión del agua que puedan sobrevenir en el futuro.

El trabajo contribuye a evidenciar el potencial de los modelos de simulación de sistemas bajo el enfoque de la dinámica de sistemas, como una metodología científica que permite integrar distintas perspectivas teóricas complementarias para explorar los elementos y relaciones básicas que gobiernan la evolución del sistema.

Mejor que posibilidades de pronóstico, el modelo de simulación construido revela interesantes posibilidades de análisis de escenarios. La fortaleza del modelo estriba en la posibilidad de integrar, de manera relativamente simple y en un solo modelo de simulación, conceptos y relaciones conocidas, para generar simultáneamente la posibilidad de entender las causas estructurales del comportamiento del sistema.

En suma, el modelo de simulación construido revela ser una propuesta interesante para el estudio de fenómenos semejantes considerados en esta investigación, que abre las posibilidades de análisis de escenarios de simulación que integran conceptos y proposiciones teóricas básicas en visiones coherentes, a partir de las cuales se podrían identificar las dinámicas del sistema para su investigación posterior.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

- a. Se sugiere realizar un modelo de este tipo considerando como variable la categoría de consumidores de agua potable en la ciudad de Andahuaylas como es: Social, Doméstico, Comercial, Industrial y Estatal.
- b. Es necesario que la gestión del agua potable, tenga prioridad política para que los planes de desarrollo económico que impulsa el Gobierno Regional de Apurímac y los gobiernos locales de la provincia de Andahuaylas, destinen recursos para la educación ambiental, capacitación con respecto a la gestión eficiente del uso del agua potable, los gobiernos en sus diferentes niveles de actuación, están en el deber de asegurar a los ciudadanos el derecho al uso del agua, por lo que deben destinarse recursos específicos para asegurar a largo plazo la producción de dicho recurso, que es un bien indispensable para la vida humana. Es necesario procurar la sustentabilidad del mismo tanto en lo que respecta a su cantidad como en su calidad.
- c. Adicionalmente a los alcances de la implementación de la dinámica de sistemas a este caso de estudio, se debe sumar el poder comunicativo que pueden tener la realización de simulaciones interactivas, en talleres con los usuarios y tomadores de decisión, dada la retroalimentación que puede ocurrir con las variables del modelo. Todo ello con el fin de sensibilizar a los participantes acerca de la respuesta que el sistema puede tener a sus interrelaciones internas y externas, al tiempo que se pueden obtener decisiones concertadas, que al ser apropiadas de mejor manera generen en las personas un mayor compromiso de actuación.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. ANA (2005). La gestión del agua en el Perú. Lima, Perú.
2. Angerhofer B. y Angelides M. (2000). System Dynamics Modelling in Supply Chain Management: Research Review. Proceedings of the 2000 Winter.
3. Aracil, J.(1986). Introducción a la Dinámica de Sistemas. Madrid, España.
4. Aracil, J., & Gordillo , F. (1997). Dinámica de sistemas. Madrid: Alianza Editorial.
5. Bartoli, R. (2008). Aprovechamiento de aguas subterráneas. Buenos Aires, Argentina.
6. Becerra, F. (2007). Balance hídrico. Cali, Colombia.
7. Bernal, C.(2010). Metodología de la investigación para administración, economía, humanidades y ciencias sociales.
8. Bertalanffy, L. V. (1976). Teoría General de Sistemas. New York: Progreso S.A.
9. Blanchard, B. S. (1993). Administración de Ingeniería de Sistemas. México: Limusa S.A.
10. Brian, W. (1993). Sistemas: Conceptos, Metodologías y Aplicaciones. Limusa.
11. Bunge, M., Martínez, L., y Ruíz, B.(2012). Escenarios de la dinámica hídrica de la región de aporte del sistema Cutzamala, México, D.F., México: Mc Graw Hill.
12. Carrasco, A. (2005). Metodología de la Investigación Científica (1ª ed). Lima, Perú, Mc Graw Hill.
13. Caselles, A. (2009). Modelos de Simulación por Ordenador. Valencia, España.
14. Domínguez Calle, Efraín y Moreno Pedro (2008). Relaciones demanda-oferta de agua y el índice de escasez de agua como herramientas de evaluación del recurso hídrico Colombiano. Departamento de Ecología y Territorio, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

15. Drew, M. (1995). Business dynamics. Belo Horizonte, Brasil.
16. Escobedo (2008). Gestión ambiental del desarrollo urbano. Universidad Nacional de la Plata, Argentina.
17. Escolero, Y. (2009). Dinámica para el abastecimiento de agua para consumo humano. Montevideo, Uruguay.
18. Fernández, N. (2007). Modelación y Simulación Dinámica para la Gestión de Caudales en la Cuenca Alta del Río Pamplonita-Un Balance Hídrico de Consumo. Pamplona, España.
19. Forrester, J. W. (1971). Dinámica Industrial. Argentina: Ateneo.
20. Forrester, J. (1961). Industrial Dynamics. Productivity Press, Cambridge MA.
21. García, J. M. (2003) Teoría Y Ejercicios Prácticos De Dinámica De Sistemas. 1ra Edición de autor. Barcelona, España.
22. García, J. (2006). Teoría y Ejercicios Prácticos de Dinámica de Sistemas, Barcelona, España.
23. Geoffrey, G. (1991). Simulación de Sistemas. México.
24. Gordillo, J. (1995). Iniciación a la simulación dinámica. Barcelona, España.
25. Hernández R; Fernández C; y Baptista P (1997). Metodología de la Investigación.
26. Hernandez Sampieri, R. (2005). Metodología de la investigación. Interamerica editores S. A.
27. Huertas I.; Forero C.; Verástegui M.R. (2010). Modelo de Dinámica de Sistemas para las hierbas orgánicas - la manzanilla. Universidad EAFIT.
28. León, J. y Quintana, A. (2008). Propuesta de aprovechamiento sustentable del recurso hídrico. Municipio Juan Antonio Sotillo, Venezuela.

29. Luemberger, S. (1997). Dynamics of growth in a finite world. Cambridge, Massachusetts.
30. Martinez P. (2016). Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. Universidad de las Américas, Puebla, México.
31. Martínez J.; Esteve M.A. (2010). Gestión integrada de cuencas costeras: dinámica de los nutrientes en la cuenca del Mar Menor (sudeste de España). Departamento de Ecología e Hidrología, Universidad de Murcia. España.
32. Mateu, B. (2004). System Dynamics Review. London, Inglaterra.
33. Mays, L. (2002). Manual de sistemas de distribución de agua. Madrid, España.
34. MINSA Perú (2005). Agua potable en el Perú. Lima, Perú.
35. Morales, A. (2010). Iniciación en la dinámica de sistemas. Bogota, Colombia.
36. Morlan, J.(2010). Water Resources Managment. New York,USA.
37. Ordoñez, A. (2005). Sistema de distribución de agua para consumo humano en la Ciudad de Santa Cruz. Santa Cruz, Bolivia.
38. Orozco, L.(1999). Alternativas de manejo al problema de abastecimiento hídrico a través de dinámica de sistemas. Bogotá, Colombia.
39. Rosnay, B. (1988). Dinámica de Sistemas (2ª ed). España, Mc Graw Hill.
40. Rubio A. (2016). Desarrollo y aplicación de un modelo de dinámica de sistemas para la gestión integral del sistema Júcar. Título del trabajo fin de Máster, para optar el grado de Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
41. Saravia, N. (2004). El agua en el mundo. Caracas, Venezuela.
42. SEDAPAL (2010). Sistema de distribución del agua en la Ciudad de Lima. Lima, Perú.

43. Senge, P. (1995). *La Quinta Disciplina*. Barcelona, España.
44. Senge, P. M (1995) *La quinta disciplina en la práctica. Cómo construir una organización inteligente*. Ediciones Juan Granica, S.A., Barcelona, España.
45. Shell, K. (1998). *Dinámica industrial*. Boston, USA.
46. Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento-SUNASS(2012). *Determinación de la Fórmula Tarifaria, Estructura Tarifaria y Metas de Gestión Aplicable a la Entidad Prestadora de Servicios de Saneamiento EPSASA*. Lima, Perú.
47. Tuya, P., Ramos, O. y Dolado, N. (2000). *Tendencias del medio ambiente*. Caracas, Venezuela.
48. Veroíza R. (2009). *Modelamiento del suministro de agua para satisfacer la demanda a costos optimizados*. Departamento de Ingeniería de Sistemas, Universidad de la Frontera, Talca, Chile.
49. Zabala, M. (2011). *Análisis de estrategias de desarrollo sostenible a nivel de una cuenca hidrográfica: Aplicación de la dinámica de sistemas al caso de la cuenca del río Yumbo*. Trabajo de grado presentado para optar el título de Economista, Facultad de Ciencias Sociales y Económicas, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
50. Zambrana M. (2009). *Modelo de simulación del equilibrio hídrico: una aplicación de la dinámica de sistemas en el análisis y toma de decisiones sobre el volumen de agua no contabilizada en Sela–Oruro*. Facultad de Ciencias Económicas Financieras y Administrativas, Universidad Técnica de Oruro, Oruro, Bolivia.

# ANEXO

## ANEXO A

### MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

VARIABLES	INDICADORES	ITEMS	FUENTE
Modelo de simulación	Diagrama Causal (Modelo cualitativo)	¿Cuáles son las variables cualitativas del sistema?	Libros de Dinámica de Sistemas, Simulación, Tesis, Análisis y Elaboración propia.
		¿Cuál es la relación causa-efecto entre las variables del sistema?	
		¿Cuáles son los lazos de realimentación?	
	Diagrama de Forrester (Modelo cuantitativo)	¿Cuáles son las variables de nivel con datos cuantitativos y unidades de medida homogenizados del sistema?	
		¿Cuáles son las variables de flujo con datos cuantitativos y unidades de medida homogenizados?	
		¿Cuáles son las variables auxiliares con datos cuantitativos y unidades de medida homogenizados?	
		¿Cuáles son la simulación de las variables?	
		¿Cuáles serían los escenarios más importantes?	
		¿Qué muestra o explica los gráficos y tablas?	
Abastecimiento de agua potable	Producción de agua potable	¿Cuál es el volumen de agua cruda captado?	Información documental y magnética proporcionada por la EMSAP CHANKA e Información documental de SUNASS.
		¿Cuál es el volumen agua potable producido?	
	Demanda de agua potable	¿Cuál es el consumo percapita de agua potable?	
		¿Cuánto es el costo por m <sup>3</sup> de agua potable?	

## ANEXO B

### FICHA PARA EL ANÁLISIS DOCUMENTAL

<b>Autor:</b> Sunass <b>Título:</b> Estudio Tarifario 2017 – EMSAP CHANKA <b>Año:</b> 2017	<b>Ciudad, País:</b> Lima, Perú
<b>Tema:</b> Estimación de la cantidad demanda del servicio de agua potable	
<b>Página:</b> 48	
<b>Ficha N° 01</b>	

<b>Autor:</b> Sunass(Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento) <b>Título:</b> Estudio Tarifario-EMSAP CHANKA <b>Año:</b> 2007	<b>Ciudad, País:</b> Lima, Perú
<b>Tema:</b> Sistema de Abastecimiento de Agua Potable en la ciudad de Andahuaylas	
<b>Página:</b> 16,17	
<b>Ficha N° 02</b>	

<b>Autor:</b> Municipalidad Provincial de Andahuaylas <b>Título:</b> Estudio de Pre inversión a Nivel de Perfil Simplificado <b>Año:</b> 2008	<b>Ciudad, País:</b> Andahuaylas, Perú
<b>Tema:</b> Población Actual y Referencial-ciudad de Andahuaylas	
<b>Página:</b> 4,48,72	
<b>Ficha N° 03</b>	

<p><b>Autor:</b> Municipalidad Provincial de Andahuaylas</p> <p><b>Título:</b> Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Andahuaylas 2010-2022</p> <p><b>Año:</b> 2010</p>	<p><b>Ciudad, País:</b> Andahuaylas, Perú</p>
<p><b>Tema:</b> Expansión Urbana - ciudad de Andahuaylas</p> <p><b>Página:</b> 14-42</p>	
<p style="text-align: right;"><b>Ficha N° 04</b></p>	

<p><b>Autor:</b> ESAN</p> <p><b>Título:</b> Formulación del Plan Estratégico 2010-2014 y Plan Operativo Anual(POA) 2010 de EMSAP CHANKA</p> <p><b>Año:</b> 2009</p>	<p><b>Ciudad, País:</b> Lima, Perú</p>
<p><b>Tema:</b> Gerencia Comercial</p> <p><b>Página:</b> 37,38,49,50</p>	
<p style="text-align: right;"><b>Ficha N° 05</b></p>	

**ANEXO C**  
**GUIA DE ENTREVISTA**

<b>ENTREVISTA</b>		
Entrevistado	Sr(a):	Cargo:
Entrevistador		Fecha:
Ubicación:		
<b>SOBRE EL DIAGRAMA CAUSAL</b>		
Puntos de la entrevista:		Respuesta del Entrevistado
1.¿Cuáles son los principales componentes y actores del sistema de agua potable en la ciudad de Andahuaylas		
2.¿De que manera y en que grado se relacionan cada componente del sistema de agua potable?		
3.¿Cómo afecta a los componentes del sistema de agua potable una disminución en la captación del agua potable?		
<b>SOBRE EL DIAGRAMA DE FORRESTER</b>		
Puntos de la entrevista:		Respuesta del Entrevistado
1.¿Cuál es la población actual total de la ciudad de Andahuaylas?		
2.¿Como hace los pronósticos del crecimiento poblacional?		
3.¿Cómo calcula la demanda del agua potable?		
4.¿Cómo hace el pronóstico para abastecer el agua potable en cierta época del año?		
<b>SOBRE LA PRODUCCIÓN DEL AGUA POTABLE</b>		
Puntos de la entrevista:		Respuesta del Entrevistado
1.¿Cuáles son los fuentes de abastecimiento de agua cruda?		
2.¿Cuál es el caudal promedio total de agua cruda captado?		
3.¿Cuál es el volumen total captado de agua cruda por año?		
4.¿Que volumen de agua potable se produce por año?		
5.¿Cuál es el costo para producir un m <sup>3</sup> de agua potable?		
6.¿Cuál es el volumen disponible de agua potable para la ciudad de Andahuaylas?		
<b>SOBRE LA DEMANDA DE AGUA POTABLE</b>		

1.¿Cuál es la cantidad de usuarios del agua potable?	
2.¿Cuál es el volumen disponible de agua potable para la ciudad?	
3.¿Cuál es el volumen consumido de agua potable por año?	
4.¿Cuál es la tarifa promedio cobrado a los usuarios por m <sup>3</sup> ?	
5.¿Que sector o categoria consume mayor cantidad de agua potable?	Social <input type="checkbox"/> Doméstico <input type="checkbox"/> Estatat <input type="checkbox"/> Comercial <input type="checkbox"/> Industrial <input type="checkbox"/>
<b>SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA POTABLE</b>	
1.¿Cómo se realiza la distribución del agua potable en la ciudad de Andahuaylas?	
2.¿Cuáles son los sectores de distribución del agua potable?	
3.¿Cuántos tanques de almacenamiento de agua potable se encuentra en la ciudad?	
4.¿Que volumen de almacenamiento tiene cada tanque?	
5.¿Como se hace llegar el agua a ciertas zonas de la ciudad en la que no llega las presiones de agua, y que falta conexiones?	

**ANEXO D: MATRIZ DE CONSISTENCIA**

<b>PROBLEMAS</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>HIPOTESIS</b>	<b>VARIABLES E INDICADORES</b>
<p><b>1.PROBLEMA PRINCIPAL</b> ¿En que medida un modelo de simulación predice en el abastecimiento del agua potable en la ciudad de Andahuaylas, al 2050?</p> <p><b>2.PROBLEMAS SECUNDARIOS</b></p> <p>a) ¿Cómo el modelo cualitativo del diagrama causal apoyará en la predicción del abastecimiento de agua potable en la ciudad de Andahuaylas?.</p> <p>b) ¿En qué medida el modelo cuantitativo del diagrama de Forrester insidirá en la predicción del abastecimiento del agua potable en la ciudad de Andahuaylas?.</p>	<p><b>1.OBJETIVO PRINCIPAL</b> Desarrollar un modelo de simulación para predecir el abastecimiento del agua potable para la ciudad de Andahuaylas al 2050; mediante la dinámica de sistemas, la teoría general de sistemas, un software de simulación, con el propósito de satisfacer la demanda de usuarios del agua potable, con la finalidad de contar con un modelo de simulación para predecir el abastecimiento del agua potable.</p> <p><b>2. OBJETIVOS SECUNDARIOS</b></p> <p>a) Elaborar el diagrama causal para predecir el abastecimiento del agua potable, identificando las variables relevantes y analizando los lazos de realimentación, con la finalidad de tener el modelo cualitativo del sistema.</p> <p>b) Construir el diagrama de Forrester para pronosticar el abastecimiento del agua potable con la finalidad de tener el modelo cuantitativo del sistema, y tener los pronósticos de la producción y demanda de agua potable al 2050.</p>	<p><b>1.HIPÓTESIS GENERAL</b> El modelo de simulación permite predecir el abastecimiento del agua potable en la ciudad de Andahuaylas al 2050. Asimismo nos permite facilidades a través de la modelación y simulación el entendimiento y comportamiento de las diferentes variables del sistema de agua potable bajo diversos escenarios; por lo que contribuirá en la gestión integral del agua potable.</p> <p><b>2.HIPÓTESIS SECUNDARIAS</b></p> <p>a) El Diagrama causal nos permite elaborar el modelo cualitativo del sistema para apoyar en la predicción del abastecimiento del agua potable.</p> <p>b) El diagrama de Forrester nos permite construir el modelo cuantitativo del sistema a partir de la cual se obtendrá los pronósticos de la producción y demanda de agua potable al 2050 para la ciudad de Andahuaylas.</p>	<p><b>1.VARIABLE INDEPENDIENTE</b> X: Modelo de Simulación</p> <p><u>Indicadores</u></p> <p>X1: Diagrama causal</p> <p>X2: Diagrama de Forrester</p> <p><b>2.VARIABLE DEPENDIENTE</b> Y: Abastecimiento de agua potable</p> <p><u>Indicadores</u></p> <p>Y1: Producción de agua potable</p> <p>Y2: Demanda de agua potable</p>

## ANEXO E

### DISTRIBUCIÓN DEL AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE ANDAHUAYLAS

