



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO**

**ANÁLISIS AL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE  
PRODUCCIÓN DE LOS PROYECTOS DE MEJORAMIENTO DE RIEGO  
EJECUTADOS EN LA REGIÓN DEL CUSCO**

**Línea de investigación:**

**Sistemas de información y optimización**

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería de Sistemas

**Autor:**

Romero Flores, Robert Antonio

**Asesora:**

Alfaro Bardales, Maria Renee  
(ORCID: 0000-0003-4601-6748)

**Jurado:**

Manrique Suárez, Luis Humberto

Rodriguez Rodriguez, Ciro

Soto Soto, Luis

**Lima - Perú**

**2023**

## Reporte de Análisis de Similitud

Archivo:

Fecha del Análisis:

Analizado por:

Correo del analista:

Porcentaje:

Título:

Enlace:



DRA. MIRIAM LILIANA FLORES CORONADO  
JEFA DE GRADOS Y GESTIÓN DEL EGRESADO



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**VRIN** | VICERRECTORADO  
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSTGRADO

ANÁLISIS AL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LOS  
SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE LOS PROYECTOS DE  
MEJORAMIENTO DE RIEGO EJECUTADOS EN LA REGIÓN  
DEL CUSCO

Línea de Investigación:

Sistemas de Información y Optimización

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

Autor:

ROMERO FLORES ROBERT ANTONIO

Asesor:

Alfaro Bardales, Maria Renee  
(ORCID: 0000-0003-4601-6748)

Jurado:

Luis Humberto Manrique Suárez  
Ciro Rodriguez Rodriguez  
Luis Soto Soto

Lima - Perú

2023

**DEDICATORIA**

A mi Sra. madre, Rosa ejemplo de perseverancia y dedicación, quién siempre lucha por lo que es justo.

A la raza de ingenieros que llevan el progreso en las regiones más recónditas del Perú.

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a las personas que han proporcionado información y apoyo incondicional para el desarrollo de la presente tesis, es importante mencionar a la Dra. Maria Renee Alfaro, asesora de esta tesis, al Dr. Filiberto Ochoa por sus acertados consejos para llevar a cabo la investigación.

Asimismo, agradecer las correcciones, sugerencias, predisposición y tiempo de los jurados Dr. Luis Manrique, Dr. Ciro Rodríguez y el Dr. Luis Soto, sin su apoyo y experiencia no se hubiera llevado a cabo en buenos términos la presente tesis.

Finalmente, a mi familia quienes esperaron con mucha expectativa que termine la presente tesis y que ostente el grado de Doctor, y así les dedique más tiempo.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABLAS .....	ix
RESUMEN .....	x
ABSTRACT.....	xi
ABSTRATO .....	xii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Descripción del problema.....	2
1.3. Formulación del problema .....	4
1.4. Antecedentes .....	4
1.5. Justificación de la investigación.....	14
1.6. Limitaciones de la investigación .....	15
1.7. Objetivos .....	16
1.8. Hipótesis.....	17
II. MARCO TEÓRICO .....	18
2.1. Bases Teóricas.....	18
2.2. Marco conceptual .....	43
2.3. Aspectos de responsabilidad social y medio ambiental .....	46
2.4. Marco Filosófico .....	48
III. MÉTODO .....	53
3.1. Tipo de Investigación .....	53
3.2. Población y muestra. ....	53
3.3. Operacionalización de variables.....	55
3.4. Instrumentos de investigación .....	56
3.5. Procedimientos .....	60
3.6. Análisis de datos.....	159
IV. RESULTADOS.....	173
4.1. Contrastación de hipótesis.....	173
4.2. Análisis e interpretación.....	177
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	192
VI. CONCLUSIONES .....	193
VII. RECOMENDACIONES.....	195

VIII. REFERENCIAS.....	196
IX. ANEXOS .....	202

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interpretación geométrica de la derivada .....	32
Figura 2: Máximos y mínimos de una función .....	34
Figura 3: Condición de Kuhn Tucker .....	38
Figura 4: Condición de Kuhn Tucker .....	38
Figura 5: Condición de Kuhn Tucker .....	39
Figura 6: Funcionamiento de algoritmos genéticos .....	42
Figura 7: Elementos de un sistema “ultrasensible” .....	52
Figura 8: Diagrama contextual del entorno del sistema de producción agrícola de los proyectos ejecutados por Plan Meriss Inka.....	67
Figura 9: Sistema de producción agrícola.....	70
Figura 10: Diagrama causa efecto del sistema de producción agrícola.....	71
Figura 11: Diagrama causa efecto subsistema oferta hídrica.....	72
Figura 12: Diagrama causa efecto subsistema agua para riego .....	72
Figura 13: Diagrama causa efecto subsistema suelo agrícola.....	73
Figura 14: Diagrama causa efecto subsistema inversión .....	74
Figura 15: Diagrama causa efecto subsistema capacitación .....	74
Figura 16: Diagrama causa efecto subsistema obras .....	75
Figura 17: Diagrama causa efecto subsistema volumen de producción .....	76
Figura 18: Diagrama causa efecto subsistema mercado .....	77
Figura 19: Diagrama de Forrester de oferta hídrica por lluvias.....	80
Figura 20: Diagrama de Forrester oferta hídrica por ríos .....	80
Figura 21: Diagrama de Forrester total oferta hídrica .....	81
Figura 22: Oferta hídrica por lluvias.....	82
Figura 23: Total oferta hídrica .....	82
Figura 24: Diagrama de Forrester de agua para riego.....	85
Figura 25: Diagrama de Forrester total agua para riego .....	86
Figura 26: Agua para riego .....	86
Figura 27: Administración del agua.....	87
Figura 28: Porcentaje de avance de obra .....	87
Figura 29: Diagrama de Forrester suelo agrícola.....	88
Figura 30: Suelo agrícola actual .....	89
Figura 31: Suelo en secano .....	90
Figura 32: Diagrama de Forrester inversión mensual ejecutada.....	92
Figura 33: Presupuesto público mensual .....	93
Figura 34: Aporte comunal .....	93
Figura 35: Total inversión mensual .....	94
Figura 36: Diagrama de Forrester disponibilidad de recursos para capacitación .....	98
Figura 37: Diagrama de Forrester capacitaciones por mes.....	99
Figura 38: Diagrama causa efecto de costo mensual de capacitación .....	100
Figura 39: Presupuesto para capacitación mensual disponible.....	101
Figura 40: Disponibilidad de personal para capacitación .....	101
Figura 41: Disponibilidad de equipos para capacitación .....	102
Figura 42: Disponibilidad de material para capacitación .....	102
Figura 43: Total capacitaciones por mes .....	103

Figura 44: Total capacitaciones acumuladas .....	103
Figura 45: Diagrama de Forrester disponibilidad de recursos para obras .....	107
Figura 46: Diagrama de Forrester avance de obras mensual .....	108
Figura 47: Diagrama causa efecto de costo mensual de obras.....	109
Figura 48: Presupuesto mensual disponible para obras .....	110
Figura 49: Total avance de obra mensual .....	110
Figura 50: Diagrama de Forrester tierra de cultivo adecuada.....	115
Figura 51: Diagrama de Forrester de producto .....	117
Figura 52: Factor agua disponible para producto .....	118
Figura 53: Factor insumos para producto .....	118
Figura 54: Factor capacitación para producto.....	119
Figura 55: Factor maquinaria para producto.....	119
Figura 56: Tierra de cultivo adecuada para producto .....	120
Figura 57: Función condición climática .....	120
Figura 58: Producto (porcentaje de producción) .....	121
Figura 59: Diagrama de Forrester intensidad uso de suelo.....	122
Figura 60: Cosecha .....	123
Figura 61: Intensidad de uso de suelo.....	124
Figura 62: Diagrama de Forrester de volumen de producción .....	125
Figura 63: Volumen de producción .....	127
Figura 64: Diagrama de Forrester de mercado .....	130
Figura 65: Diagrama causa efecto de precio actual de venta de producto.....	131
Figura 66: Comportamiento de mercado potencial.....	132
Figura 67: Comportamiento de mercado actual.....	132
Figura 68: Variable mercado satisfecho .....	133
Figura 69: Precio actual de venta del producto.....	133
Figura 70: Precio actual de venta de producto.....	134
Figura 71: Total ventas por campaña.....	135
Figura 72: Total inversión por campaña .....	136
Figura 73: Cruce por un punto .....	151
Figura 74: Mutación por reemplazo aleatorio.....	152
Figura 75: Primera generación en lograr el máximo global .....	158
Figura 76: Número de generaciones que logran el máximo global .....	158
Figura 77: Número de generaciones que logran un máximo .....	159
Figura 78: Gráfico de probabilidad AD de información de tiempo en que finalizan las capacitaciones .....	166
Figura 79: Gráfico de probabilidad AD de tiempo para fortalecimiento de organización de regantes .....	167
Figura 80: Gráfico de probabilidad AD de tiempo para lograr administración del agua ..	168
Figura 81: Gráfico de probabilidad AD de tiempo para lograr eficiencia en técnicas de riego .....	168
Figura 82: Gráfico de probabilidad AD de tiempo para la aplicación de técnicas de cultivo .....	169
Figura 83: Gráfico de probabilidad AD para tiempo para culminar obras .....	170
Figura 84: Gráfico de función de probabilidad AD tiempo para lograr oferta hídrica .....	170
Figura 85: Gráfico de probabilidad AD de porcentaje de incremento de suelo agrícola... 171	171

Figura 86: Gráfico de probabilidad AD de porcentaje de incremento de volumen de producción.....	171
Figura 87: Gráfico de probabilidad AD de porcentaje de incremento de intensidad de uso de suelo .....	172
Figura 88: Estadísticas de subsistema capacitación.....	178
Figura 89: Estadística de fortalecimiento de organización de regantes .....	179
Figura 90: Estadísticas de administración de agua .....	180
Figura 91: Estadísticas de eficiencia de la aplicación de técnicas de riego .....	182
Figura 92: Estadísticas de eficiencia de la aplicación de técnicas de cultivo .....	183
Figura 93: Estadísticas subsistema obras .....	184
Figura 94: Estadísticas agua para riego .....	186
Figura 95: Estadísticas incremento de suelo agrícola .....	188
Figura 96: Estadísticas incremento volumen de producción .....	189
Figura 97: Estadísticas de incremento de uso de suelo.....	190

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Topología de diagramas de Forrester .....	28
Tabla 2: Condiciones para determinar óptimos de puntos críticos .....	35
Tabla 3: Condiciones para determinar óptimos de puntos críticos con matriz Hessiana Orlada .....	37
Tabla 4: Operacionalización de variables .....	55
Tabla 5: Tabla datos reales y resultados de simulación de caudales en m <sup>3</sup> por mes.....	57
Tabla 6: Información histórica subsistema capacitaciones .....	57
Tabla 7: Información histórica subsistema organización.....	58
Tabla 8: Información histórica subsistema obras.....	58
Tabla 9: Información histórica subsistema agua para riego.....	59
Tabla 10: Información histórica subsistema suelo agrícola.....	59
Tabla 11: Información histórica subsistema producción .....	59
Tabla 12: Información histórica subsistema intensidad uso de suelo .....	60
Tabla 13: Parámetros vista "disponibilidad hídrica" .....	79
Tabla 14: Parámetros vista agua para riego .....	84
Tabla 15: Parámetros vista principal tierra de cultivo .....	88
Tabla 16: Parámetros vista principal inversión de proyectos .....	91
Tabla 17: Parámetros de la vista capacitación .....	95
Tabla 18: Parámetros vista obras .....	104
Tabla 19: Parámetros de la vista producción .....	111
Tabla 20: Parámetros de intensidad de uso de suelo.....	122
Tabla 21: Parámetros de f producción(t) .....	124
Tabla 22: Parámetros de la vista precio de venta.....	128
Tabla 23: Estructuras de costos directos para la producción de papa.....	142
Tabla 24: Parámetros para los algoritmos genéticos.....	156
Tabla 25: Comparación del desempeño de algoritmos genéticos con diferentes operadores de selección.....	157
Tabla 26: Información histórica subsistema capacitación .....	160
Tabla 27: Información histórica fortalecimiento de la organización .....	160
Tabla 28: Información histórica administración del agua.....	161
Tabla 29: Información histórica aplicación de técnicas de riego.....	162
Tabla 30: Información histórica aplicación técnicas de cultivo.....	162
Tabla 31: Información histórica tiempo para culminar obras .....	163
Tabla 32: Información histórica oferta hídrica con proyecto.....	164
Tabla 33: Información histórica suelo agrícola .....	164
Tabla 34: Información histórica volúmenes de producción.....	165
Tabla 35: Información histórica intensidad uso de suelo.....	165
Tabla 36: Estadística descriptiva de subsistemas e indicador .....	165
Tabla 37: Valor p de los subsistemas.....	165
Tabla 38: Funciones objetivo y restricciones.....	165
Tabla 39: Número de generaciones que logran el máximo global.....	165

## RESUMEN

La presente tesis expone el análisis del modelo de optimización para sistemas de producción agrícola en proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región Cusco. El objetivo es Demostrar si el modelo de optimización influye en la administración de los sistemas de producción agrícola en el mejoramiento de riego en la provincia de Anta - Cusco. Como método empleado para el desarrollo del modelo de optimización primero se ha conceptualizado los subsistemas, posteriormente se ha formulado un modelo de simulación. Y por último se construye el modelo de optimización basado en programación no lineal y algoritmos genéticos para determinar los óptimos y el análisis de punto de equilibrio siempre en función a su interacción con el mercado. El marco teórico incluye importantes antecedentes de optimización en investigación de operaciones, algoritmos genéticos y sus aplicaciones. En los resultados para la contrastación de hipótesis se ha utilizado la prueba de Anderson Darling para determinar la normalidad del modelo de simulación con el parámetro  $p$  y si el modelo de optimización matemático cumple con las condiciones de Khun-Tucker. En la discusión se verifica que las diversas variables del modelo han dado el valor  $p \leq 0.05$ . Por lo que el modelo de simulación es válido. También se han validado los óptimos globales y sus restricciones según Khun-Tucker; así mismo, se ha experimentado y obtenido óptimos globales con algoritmos genéticos. Por tanto, el modelo de optimización contribuirá al entendimiento del proceso productivo agrícola en los andes peruanos.

*Palabras Clave:* Investigación de operaciones, simulación de sistemas, optimización, modelamiento matemático, procesos de producción.

## ABSTRACT

This thesis presents the analysis of the optimization model for agricultural production systems in irrigation improvement projects executed in the Cusco region. The objective is to demonstrate if the optimization model influences the administration of agricultural production systems in the improvement of irrigation in the province of Anta - Cusco. As a method used for the development of the optimization model, first, the subsystems have been conceptualized, then a simulation model has been formulated. Finally, the optimization model based on nonlinear programming and genetic algorithms is built to determine the optimal ones and the break-even point analysis, always based on its interaction with the market. The theoretical framework includes important history of optimization in operations research, genetic algorithms and their applications. In the results for the verification of hypotheses, the Anderson Darling test has been used to determine the normality of the simulation model with the parameter  $p$  and if the mathematical optimization model meets the Khun-Tucker conditions. In the discussion it is verified that the various variables of the model have given the value  $p \leq 0.05$ . Therefore, the simulation model is valid. The global optima and their restrictions according to Khun-Tucker have also been validated; likewise, global optima have been experimented with and obtained with genetic algorithms. Therefore, the optimization model will contribute to the understanding of the agricultural production process in the Peruvian Andes.

*Keywords:* Operations research, systems simulation, optimization, mathematical modeling, production processes.

## ABSTRATO

Esta tese expõe a análise do modelo de otimização para sistemas de produção agrícola em projetos de melhoria de irrigação executados na região de Cusco. O objetivo é demonstrar se o modelo de otimização influencia a administração dos sistemas de produção agrícola na melhoria da irrigação na província de Anta - Cusco. Como método utilizado para o desenvolvimento do modelo de otimização, primeiro foram conceituados os subsistemas, depois foi formulado um modelo de simulação. E por fim, o modelo de otimização baseado em programação não linear e algoritmos genéticos é construído para determinar os ótimos e a análise do ponto de equilíbrio, sempre com base em sua interação com o mercado. O referencial teórico inclui importante histórico da otimização em pesquisa operacional, algoritmos genéticos e suas aplicações. Nos resultados para a verificação das hipóteses, foi utilizado o teste de Anderson Darling para determinar a normalidade do modelo de simulação com o parâmetro  $p$  e se o modelo de otimização matemática atende às condições de Khun-Tucker. Na discussão verifica-se que as diversas variáveis do modelo deram o valor  $p \leq 0,05$ . Portanto, o modelo de simulação é válido. Os ótimos globais e suas restrições de acordo com Khun-Tucker também foram validados; da mesma forma, ótimos globais foram experimentados e obtidos com algoritmos genéticos. Portanto, o modelo de otimização contribuirá para a compreensão do processo de produção agrícola nos Andes peruanos.

*Palavras - chave:* Pesquisa operacional, simulação de sistemas, otimização, modelagem matemática, processos de produção.

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Planteamiento del problema

La implementación de los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados por el Proyecto Especial Plan Meriss Inka que a partir de esta sección del documento denominaremos PEPMI, no cumplen un estándar definido para sus diferentes fases (Estudios, Programación, Valorización, Monitoreo, etc.),<sup>1</sup> estos proyectos están relacionados con diferentes sistemas socio – económicos ubicados dentro del ámbito del proyecto, dentro de ellos podemos destacar el “Mercado”, que determina si el proyecto es sostenible en el tiempo; la sostenibilidad de estos proyectos se mide principalmente por la utilidad y el fortalecimiento de las organizaciones de regantes, factores que Feliz Hurtado identifica como componentes transversales (Hurtado Huaman, 2014). Por lo que es importante conocer los valores óptimos de producción y bajo qué condiciones pueden darse en relación principalmente al mercado (Milan Eric, 2016).

Primeramente, abordamos el problema proponiendo y validando un modelo de simulación basado en modelos matemáticos sobre las diferentes fases del proceso de producción. Posteriormente se plantea el modelo a optimizar sobre el cual se podrán obtener máximos, mínimos y análisis de punto de equilibrio. Para realizar este análisis existen técnicas que combinan la investigación de operaciones y las técnicas de cálculo diferencial como son: matrices hessianas, programación y programación no lineal, las mismas que exigen según corresponda el planteamiento respectivo de las restricciones. (Taha, 2004) Es de entender que en estas restricciones se debe considerar obligatoriamente el mercado, además que esto es coherente con el pensamiento sistémico, el cual propone métodos sintéticos, que estudien el sistema de producción de los proyectos de mejoramiento de riego como parte de un sistema mayor (Senge, 1998). Es importante mencionar que al formular el modelo matemático o

---

<sup>1</sup> En reuniones de trabajo interinstitucionales se ha observado este problema al ejecutar proyectos en diferentes instituciones del estado, ONGs y otros.

también conocido como función de decisión la aplicación de los métodos de investigación de operaciones permite conocer el máximo o mínimo globales. Además, existen técnicas y métodos de aprendizaje de máquinas, dentro de los cuales los más adecuados para la optimización son los algoritmos genéticos, métodos que basan su aplicación en la combinación de los mejores individuos de una población, cuyo resultado permite conocer un óptimo local (máximo o mínimo). Por lo que proporcionaremos a los proyectistas herramientas necesarias para planificación adecuada del proceso productivo que permitan maximizar la utilidad y minimizar los costos.

## **1.2. Descripción del problema**

Para la implementación de proyectos de mejoramiento de riego se requiere un enfoque multidisciplinario que involucra la participación de varios profesionales como antropólogos, ingenieros civiles, ingenieros agrónomos, sociólogos, economistas, etc., como menciona Felix Hurtado “el desarrollo rural es un desafío multidisciplinario” (Hurtado Huaman, 2014). Las múltiples variables socioeconómicas que existen crean bastante incertidumbre para la toma de decisiones en las fases de gestión del proyecto. Se requieren largos periodos de tiempo para ver los efectos de una decisión. Debido a la complejidad de estos proyectos aparecieron efectos negativos en los proyectos implementados en las provincias de Chumbivilcas y Espinar donde se observó que luego de algunos años se presentó el fenómeno de sobreproducción<sup>2</sup>, a consecuencia de este fenómeno los proyectos ingresaron en una fase de recesión regional con la consecuencia de baja en los precios de venta de los productos agroindustriales (principalmente derivados lácteos) llegando a comercializarse estos a precios por debajo de los costos de producción, la conclusión a la que se llegó en reuniones de trabajo multidisciplinarias fue que en la etapa de estudio no se consideró un adecuado estudio de mercado que permitiera

---

<sup>2</sup> Este caso ha sido expuesto por la entonces Unidad Operativa Chumbivilcas Espinar en la Reunión de Evaluación Anual del año 2003

determinar la demanda límite del mercado existente. Es importante resaltar que este fenómeno de recesión regional se produjo después de algunos años de bonanza económica en las provincias de Chumbivilcas y Espinar como consecuencia de la exitosa implementación de los proyectos de mejoramiento de riego. Similares fenómenos ocurren con la producción de la papa, cuyo precio muestra significativos decrementos en las principales plazas a nivel nacional esto debido a diversos factores como ampliación de la frontera agrícola, sobreproducción, etc., esta información está sistematizada en los boletines del Ministerio de Agricultura (Ministerio de Agricultura y Riego, 2019).

Para superar estos problemas se pretende modelar el sistema de producción agrícola usando la metodología de dinámica de sistemas. Este modelo permitirá realizar simulaciones y análisis de sensibilidad; y así proyectar posibles escenarios futuros que permitan medir el rendimiento del sistema principalmente con relación al comportamiento del mercado y determinar si este será sostenible a largo plazo. Posteriormente con esta información proponer un modelo de optimización que permita comparar la variedad de respuestas con "las más deseable", es decir los valores óptimos para el sistema de producción (Otero et al., 2006), en este caso: "maximizar la utilidad", determinar en qué condiciones y/o restricciones se pueden obtener (estacionalidad, volumen de producción, etc.), y así obtener mejores herramientas para planificar adecuadamente el proceso de producción. También se debe realizar un "análisis de punto de equilibrio" que permita conocer los valores mínimos a obtener para no incurrir en pérdidas y "minimizar los costos de producción".

De lo anteriormente señalado se puede resumir que existe un problema de mayor relevancia y es la:

“Falta de herramientas para determinar los valores óptimos sobre el comportamiento futuro de los sistemas de producción para los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región del Cusco que permitan mejorar la administración de los mismos”.

Por estos antecedentes, se pretende desarrollar: “modelo de optimización de los sistemas de producción agrícola de los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región del Cusco”.

### **1.3. Formulación del problema**

#### **- Problema general**

- ¿De qué manera el modelo de optimización influye en la administración de los sistemas de producción agrícola en el mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco?

#### **- Problemas específicos**

- ¿Cómo un modelo matemático de optimización influye en la rentabilidad del mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco?
- ¿Cómo los algoritmos genéticos influyen en la rentabilidad del mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco?

### **1.4. Antecedentes**

"Optimización de Sistemas de Producción: Esquemas de Optimización en dos fases" (Rodríguez Diego, 2004).

En la presente investigación el autor desarrolla: "una herramienta integrada para la optimización automatizada de Sistemas de Eventos Discretos, en el entorno de aplicación de los sistemas de fabricación" luego de describir algunos problemas de optimización que se presentan en sistemas de fabricación, el autor presenta: “la integración de dos herramientas existentes para modelar y evaluar con redes de Petri y un paquete de uso

general la optimización basada en Simulated Annealing” (Aarts Emile, 1989). La consideración de un “cache” y de una técnica de dos fases para la optimización permite acelerar la optimización en un factor de 35” (Rodriguez Diego, 2004). En la investigación se hace énfasis en que la función a optimizar es la de “beneficio” (la utilidad después de vender las piezas fabricadas).

Las conclusiones a las que el autor llega son las siguientes:

1. Identifican como la función de utilidad a maximizar la siguiente:  

$$f()=172800*\text{Throughput}("T1")+345600*\text{Throughput}("T4")-10*\text{AvMarking}("Pwip")-250*\text{ParValue}("AGVnum")-20*\text{ParValue}("Pallets")-2000.$$
2. Los experimentos llevados a cabo con dos y tres fases del proceso de optimización muestran una importante ganancia en términos computacionales, asimismo no pierde calidad significativamente.
3. El sistema de fabricación ha sido modelado con una red Petri y la optimización de sistemas complejos tienen un costo computacional alto, a pesar de utilizar Simulated Annealing. Además que el método bifásico reduce el esfuerzo en 5, que es una solución buena (Rodriguez Diego, 2004).

“Optimización Multiobjetivo Basada en Mallas Variables” (Yamisleydi, 2016).

En su tesis doctoral la autora hace referencia a las investigaciones con el objetivo de crear nuevas p-metaheurísticas para encontrar aproximaciones más precisas en cuanto a la convergencia al frente de Pareto y su distribución, y los métodos nuevos capaces de lidiar con entornos multiobjetivo y la creación de métodos híbridos capaces de resolver problemas mono y multiobjetivo, teniendo en cuenta el costo computacional. Por tanto, se plantea como problema de investigación: "Insuficiencias en los mecanismos de búsqueda de las p-metaheurísticas de optimización multiobjetivo, que afectan la efectividad de las

aproximaciones al frente de Pareto" (Yamisleydi, 2016). Y plantea como objetivo general: "Extender la p-metaheurística (Optimización basada en Mallas Variables) a entornos multiobjetivo, para la obtención de aproximaciones al frente de Pareto más efectivas" (Yamisleydi, 2016), la autora muestra la evaluación de los resultados con el proceso de producción de acero inoxidable en la empresa ACINOX Las Tunas y posteriormente formaliza el modelo de optimización multiobjetivo para el cálculo de adiciones para la producción del acero inoxidable (Yamisleydi, 2016).

La autora llega a las siguientes conclusiones:

1. Los Algoritmos Evolutivos de Optimización Multiobjetivo permiten el análisis multicriterio. Existen muchas técnicas de p-metaheurísticas, pero todavía se pueden proponer mejoras, a través de la incorporación de nuevos mecanismos de búsqueda y/o combinando los mecanismos existentes.
2. Con los experimentos realizados se comprobó que el método MOVMO obtuvo aproximaciones respecto de Pareto aceptables e incluso mejores en relación con las metaheurísticas MOEA/D.DRA, MOEA/D, (cMOVMO).
3. NSGA-II, SPEA2, AbYSS, MOCcell y SMPSO están clasificadas dentro de cuatro familias de funciones de prueba sin restricciones y los resultados de los experimentos obtenidos por MOVMO en la familia LZ09 fueron de poca calidad. Esto debido principalmente al operador de cruzamiento SBX que influye en funciones con las características que tienen como requisito.
4. El modelo MOVMO mejorar la calidad de las soluciones al sustituir el operador de cruzamiento SBX, y es factible el empleo de MOVMO en la solución del modelo de optimización multiobjetivo para el caso de particular de adiciones al acero inoxidable y el uso de ambas técnicas, suministra una

herramienta muy útil para incrementar la eficacia en la producción de aceros inoxidables en la empresa “ACINOX Las Tunas” (Yamisleydi, 2016).

“Enfoque de Dinámica de Sistemas para la Optimización de la Gestión de Demanda de Riego” (Elmahdi et al., 2005).

Los autores de la presente investigación logran desarrollar un modelo de simulación basado en el enfoque de sistemas, la justificación de su investigación es la siguiente: “Problemas significantes de escases de agua y deterioro de la calidad de agua contribuyen al crecimiento de la crisis del agua en muchos países. Esta situación requiere de soluciones creativas para lograr la sostenibilidad de la administración de los recursos”.

El estudio se desarrolla en el ámbito del río Murrumbidgee en Australia donde la extracción de agua para irrigación y limpieza son los factores de mayor impacto en el medio ambiente próximo del río. La demanda para riego en este sector ha cambiado el flujo natural del río, esto ha ocasionado cambios climáticos importantes. Al incrementarse la demanda de agua se ha reducido el flujo de río y sus reservas según estaciones durante el año.

Los autores asimismo buscan técnicas para conocer la demanda de agua y lograr resultados positivos en cuanto se refiera a temas ambientales y económicos, lo cual requiere de modelamiento para analizar el impacto de escenarios alternativos tomando en cuenta las limitaciones en la disponibilidad del agua y su impacto en la producción agrícola y el medio ambiente de la zona.

La investigación presenta un enfoque básico para la optimización de los objetivos antes mencionados combinando dinámica de sistemas y el enfoque de optimización lineal para lo cual han desarrollado el modelo en red de optimización y simulación (The Network Simulation Optimisation Model NSOM), el mismo que ha sido combinado con un algoritmo matemático de programación lineal que incluye restricciones. Los investigadores describen su modelo de

la siguiente forma: “El modelo usa racionalidad económica (Ejemplo: La decisión del agricultor para maximizar el margen bruto por Mega litros) que involucra evaluar alternativas de cultivos y seleccionar la combinación de cultivos que maximiza ingresos y que minimiza el uso de agua” (Elmahdi et al., 2005).

Las conclusiones y recomendaciones de los autores son las siguientes:

1. Se ha desarrollado un modelo de programación lineal utilizando dinámica de sistemas, el cual puede determinar el uso óptimo de agua y de patrones de cultivo en un área agrícola, esto según dos objetivos: maximizar el beneficio neto y minimizar la cantidad de agua para riego. Para demostrar la viabilidad del estudio un modelo preliminar ha sido aplicado al área de irrigación conocida como “Coleambally”. Como resultados de experimentación sea logrado determinar el área de cultivo óptima para un año.
2. Los resultados preliminares muestran que una cantidad considerable de agua puede ser ahorrada y reutilizada. El volumen ahorrado puede ser usado para mejorar el flujo por estación y por ende mantener el flujo del río. El volumen de agua ahorrado se estima en 23% cuando el área de cultivo es cambiada entre 0.5 y 1.5 veces el área de cultivo actual.
3. La utilización del enfoque de dinámica de sistemas tiene el potencial para ayudar a los profesionales involucrados en el proyecto a optimizar el sistema, evaluando, priorizando y analizando variables de decisión claves (Elmahdi et al., 2005).

“Optimización de la Producción Facilitada por las Estrategias de Dividir y Conquistar” (Bjarne et al., 2015).

En la investigación los autores utilizan los algoritmos de divide y vencerás para la solución de problemas de producción aplicada principalmente en el sector de petróleo y gas, enfocándose en la optimización de la producción diaria, el mismo que da lugar a los problemas

de optimización en redes; para lo cual aplican tres enfoques, el primero divide la red en una simulación de los componentes interconectados y sus pares de manera que se diseñan algoritmos eficientes; el segundo enfoque explota una estructura de red que frecuentemente se usa en grandes sistemas de producción, sobre el cual se usa una descomposición con el método de Lagrange; y el último enfoque se realiza mediante la optimización de reservorios aplicando métodos de optimización dinámica.

Plantean como función objetivo la producción total de petróleo, siendo sus restricciones: balanceo de masa para cada fase, límites superiores e inferiores, balance de momento, caída de la presión a través de los segmentos de la tubería, límites inferiores y superiores del flujo, la conclusión de los autores es la siguiente:

1. Es importante el uso de métodos que dividen la estructura para la optimización de la producción de petróleo y gas bajo un enfoque de caja negra.
2. El estudio de la estructura por partes mejora la eficiencia y confiabilidad para el investigador e incrementa flexibilidad en la formulación del problema de optimización.

“Optimización de Parámetros del Procesos de Producción con un Nuevo Modelo Basado en Algoritmos Genéticos y Métodos de Clasificación ABC” (Milan Eric, 2016).

En la investigación los autores resaltan de manera muy didáctica que la diferencia entre los costos de producción y precio de venta de la producción es un criterio para establecer la competitividad de la organización en relación a la satisfacción del mercado (utilidad a obtener); por lo que es necesario maximizar la diferencia entre estas. Resaltan que el precio de venta en condiciones modernas de mercado es una variable que no puede afectarse significativamente. Por lo que concluyen que la organización debe enfocarse en la reducción de los costos de producción y por lo tanto la influencia que ejercen en la competitividad de la organización. En el estudio se destacan los parámetros de máquinas de producción y los procesos usados para la

creación de productos. Para definir parámetros óptimos para máquinas de producción y procesos de manera que permitan reducir costos de producción e incrementar competitividad de la organización (rendimiento en relación al mercado) los autores han creado un nuevo modelo matemático. Modelo basado en el método de clasificación ABC (Costos Basados en Actividades: Activity Based Costing) para clasificar procesos basados en líneas de producción, además han desarrollado una aplicación de algoritmos genéticos para encontrar valores óptimos para parámetros de máquinas usadas en producción usadas en el proceso.

De la misma forma los autores hacen hincapié en la influencia de factores organizacionales para poder lograr valores óptimos. Las organizaciones deben estar de acuerdo en asimilar nuevas ideas, enfoques y adoptar nuevas soluciones, la habilidad de los recursos organizacionales para adaptarse a nuevas situaciones en el mercado, los recursos a considerarse para este proceso de optimización son: financieros, recursos humanos e infraestructura. También consideran que la baja productividad en todos los niveles de la organización puede deberse principalmente a: empleados desmotivados, empleados sin las habilidades o conocimiento requerido; los autores resaltan que utilizar medidas de rendimiento no se limitan a métricas financieras, es hacer un mejor análisis interno de los procesos y del rendimiento organizacional (Milan Eric, 2016). Para definir el modelo los autores utilizan el método de clasificación ABC basados en el análisis de Pareto y el uso de Algoritmos Genéticos. De manera que todas las actividades de producción se dividen en tres grupos A, B y C, el grupo A tiene por lo general 5% al 10% del número total de las actividades de producción y 60% al 70% del costo total; el grupo B tiene entre el 20% de las actividades de producción y 30% al 35% del total del costo de producción; el resto pertenecen al grupo C. De esta forma se determina que los costos de producción se relacionan principalmente a:

- Costos laborales.
- Costos de herramientas.

- Costos de las máquinas de producción.
- Costos de enfriamiento y lubricación.

Los autores definen un modelo basado en cinco pasos dependiendo del tamaño de las actividades de producción, en el paso cinco utilizan una aplicación de Algoritmos Genéticos para actividades del grupo A (según el análisis de Pareto), para lo cual aplican la aplicación Algoritmos Genéticos para optimización del MATLAB (Milan Eric, 2016). Las conclusiones de los autores son las siguientes:

1. Los procesos modernos de producción presentan un campo interesante para la optimización, la justificación para utilizar métodos modernos de optimización es debido a la complejidad de los problemas con metas opuestas y limitaciones, y lograr demostrar que el modelo desarrollado tiene resultados óptimos para las tres líneas de producción, los parámetros óptimos reducen los costos de producción de 38% a 63%, concluyen que los métodos heurísticos analizan la función objetivo no sólo desde un punto de vista sino también desde diferentes perspectivas en un mismo espacio de búsqueda; por lo tanto, los algoritmos genéticos representan una herramienta importante para determinar parámetros óptimos en procesos de producción.

El modelo matemático basado en métodos ABC, la función de costo objetivo y la optimización por Algoritmos Genéticos proveen una solución casi óptima y pueden ser aplicadas para determinar parámetros óptimos en grandes procesos de producción en partes mecánicas con un gran número de restricciones, las restricciones en este modelo son: fresado, torneado, laminado y taladrado.

“Optimización del proceso de abastecimiento de la empresa Contugas” (Guevara Padilla et al., 2016).

En la presente tesis los autores proponen la aplicación de metodologías para optimizar el desempeño de los procesos de planificación y cadena de suministros (abastecimientos) de la empresa Contugas, empresa que realiza sus operaciones en la región de Ica y cuyos principales rubros son el petróleo y gas. Actualmente es distribuidor exclusivo de gas natural en la región Ica, ha obtenido la concesión del Estado peruano por 30 años. La capacidad de su infraestructura es de 280 millones de pies cúbicos por día. La necesidad de la presente investigación es que Contugas requiere ampliar su cartera de clientes principalmente que tengan necesidad de consumir grandes cantidades de combustibles. Dentro de sus principales objetivos que han planteado son:

- Evaluar y diagnosticar el estado actual de los principales procesos de la cadena de suministros con respecto a un marco referencial estándar e internacional.
- Analizar y seleccionar subprocesos de abastecimiento con calificación menor al estándar sugerido por el Consejo de profesionales en gestión de cadena de suministro (CSCMP).
- Elaborar proyectos que permitan incrementar el desempeño de los procesos de abastecimiento.
- Proponer el uso de mejores prácticas en la cadena de suministros.

Dentro del análisis del mercado de suministros estratégicos los autores identifican: las categorías “monitoreo” y “postventa” están en la posición “balancear”, con un valor total de USD 76.459,78. La categoría “construcción” está en la posición “diversificar” (mayor fortaleza del proveedor frente a Contugas), con un valor de USD 3.758.256,63 y No hay ninguna

categoría en la posición “explotar”, debido a la alta especialización que requieren los productos y servicios requeridos. Entre las conclusiones más resaltantes podemos mencionar:

- Mediante el diagnóstico de procesos de la empresa se han identificado brechas importantes.
- Con el uso de herramientas de clase mundial han logrado mejorar el desempeño de los procesos.
- La implementación de Supplier Relationship Management (SRM) permitirá a mediano plazo lograr migrar la cadena de suministros a un nivel colaborativo.
- Los resultados de la evaluación financiera del proyecto Supplier Relationship Management (SRM) demuestran su viabilidad, por lo que se recomienda su implementación.

“Modelo operativo componente social para optimizar proyectos en riego en la provincia de Espinar-Cusco” (Córdova Huamán, 2019).

El autor en la tesis realiza un análisis de la situación de la infraestructura hidráulica que el estado financia en la provincia de Espinar y sobre los resultados de este análisis propone un modelo operativo que garantice la sostenibilidad social y técnica de los proyectos implementados.

En el diagnóstico realizado el autor resalta que la falta de infraestructura de riego y sobre todo los problemas socio ambientales generados por las empresas mineras son restricciones para el adecuado desarrollo agropecuario de la zona pese a tener las condiciones geomorfológicas adecuadas. Menciona como los principales proyectos mineros que ocasionan conflictos sociales a Tintaya y Antapacay, además del conflicto limítrofe por la administración del agua con la región de Arequipa Majes Sigvas II Etapa.

Al igual que Plan Meriss Inka el autor de la presente tesis llega a una importante conclusión en cuanto a los perfiles para la implementación de proyectos agropecuarios: "Los Términos de Referencia de los estudios (perfiles-expediente técnicos) y ejecución de obras, presentan un enfoque estrictamente de ingeniería y no incluyen los factores de sostenibilidad, este hecho de no insertar el Componente Social en los proyectos de riego, viene originando situaciones problema que incrementan los riesgos de la inversión". Por lo que concluye que existe la necesidad de incorporar el Componente Social en todos los proyectos de riego, de manera de minimizar el riesgo de realizar inversiones. Modelo que es alternativa diseñada y aplicada por más de diez años por el autor, para incorporar el componente social en proyectos modelo FONCODES ya la Autoridad Nacional del Agua.

### **1.5. Justificación de la investigación**

El principal parámetro utilizado para la evaluación de proyectos socio – económicos es la sostenibilidad a largo plazo del mismo, sostenibilidad que para los sistemas de producción de los proyectos de mejoramiento de riego se miden principalmente según los criterios de fortalecimiento de las organizaciones y la rentabilidad económica de la producción (la utilidad); es importante el fortalecimiento de las organizaciones debido a que la misma población del ámbito del proyecto debe ser capaz de administrar sus propios destinos sin intervención de organizaciones o instituciones de ningún tipo y la rentabilidad económica mide la utilidad obtenida por la producción en su rendimiento respecto al mercado, esta que permite tener mayor acceso a sectores como salud, educación, vivienda, etc.

Con la presente investigación se desarrolló un modelo de optimización utilizando investigación de operaciones y algoritmos genéticos que permitan determinar la sostenibilidad y los valores óptimos de los sistemas de producción para proyectos de mejoramiento de riego de manera que el proyectista cuente con una herramienta para tomar decisiones para la

implementación del proyecto y la adecuada planificación del proceso de producción y así conocer las condiciones sobre las cuales se pueden producir los valores óptimos (estacionalidad, tamaño del mercado, precio, volumen de producción, etc.). Considerando principalmente los criterios de maximizar la utilidad y minimizar los costos. Además, es importante realizar el análisis de punto de equilibrio para determinar las condiciones mínimas con las que no existan pérdidas para el agricultor.

Esta información básica para determinar las condiciones óptimas de producción lamentablemente no está disponible para el agricultor, prueba de esto es que en los últimos años se ha podido observar protestas pues el precio de la papa por ejemplo cae, por efecto de la sobreproducción como consecuencia de políticas como incrementar la cantidad de suelo agrícola (Ministerio de Agricultura y Riego, 2019).

Los modelos de optimización también permitirán sistematizar mediante el uso de herramientas de computador la experiencia acumulada por los expertos del Proyecto Especial Plan Meriss Inka (PEPMI); los modelos planteados permitirán conocer posibles escenarios futuros con mayor grado de exactitud de tal forma que los proyectistas tendrán una valiosa herramienta que les permitirá también saber si las decisiones adoptadas realmente reflejan los resultados esperados o se convierten en nuevos problemas a largo plazo, entonces el modelo debe responder a preguntas como: ¿La producción es adecuada para el tamaño del mercado? ¿Por cuánto tiempo es sostenible el proyecto? ¿Cuál es el precio mínimo para no tener pérdidas? ¿Con qué precio obtengo la mayor utilidad por campaña?

## **1.6. Limitaciones de la investigación**

Las metodologías de optimización proporcionan herramientas importantes mediante la cual se puede optimizar la función objetivo teniendo en cuenta las restricciones de sus

variables, aunque el origen de estas técnicas principalmente se originó para el uso militar, en la actualidad se utiliza para problemas de industria, finanzas, agricultura, etc.

En la presente tesis se aplica principalmente la programación no lineal, sin embargo; nos encontramos ante un problema complejo cuya solución requiere de la participación multidisciplinaria de diversos profesionales, que lamentablemente aún no están familiarizados con estos métodos, peor aún, para la utilización de técnicas de aprendizaje de máquinas como son algoritmos genéticos.

En el presente trabajo de investigación tiene como ámbito geográfico de investigación la región del Cusco. Para las fases de investigación se han tomado los proyectos de mejoramiento de riego implementados por el Proyecto Especial Regional Plan Meriss Inka.

La recolección de información ha sido recabada del Proyecto de Irrigación Pampacongá ubicado en la región Cusco, provincia y distrito de Anta ejecutado por la Unidad Operativa de Anta.

## **1.7. Objetivos**

### **- Objetivo General**

Demostrar si el modelo de optimización influye en la administración de los sistemas de producción agrícola en el mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco.

### **- Objetivos Específicos**

- Determinar si el modelo matemático de optimización influye en la rentabilidad del mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco.
- Determinar si los algoritmos genéticos influyen en la rentabilidad del mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco.

## **1.8.Hipótesis**

### **- Hipótesis General**

El modelo de optimización influye en la administración de los sistemas de producción agrícola en el mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco.

### **- Hipótesis Específicas**

- El modelo matemático de optimización influye en la rentabilidad del mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco.
- los algoritmos genéticos influyen en la rentabilidad del mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Bases Teóricas

#### 2.1.1. Sistema

Según los conceptos revisados en la bibliografía podemos definir a Sistema como: "El conjunto de elementos relacionados entre sí en función de un objetivo común, actuando en determinado entorno y con capacidad de autocontrol En la definición se destaca:

- Un conjunto de elementos.
- Relación entre los elementos.
- Funcionamiento en un determinado entorno.
- Objetivos comunes.
- Capacidad de autocontrol." (Arbones Malisani, 1991, p. 15).

Epistemológicamente también se utiliza el concepto de sistema para explicar fenómenos Biológicos, biotecnológicos y filosóficos, Mario Bunge uno de los principales exponentes y defensores del desarrollo epistemológico en sus libros sistematiza la experiencia de A. Brito para explicar el concepto de organismo de la en base a sistema de la siguiente forma: "Un sistema es un objeto complejo cuyas partes o componentes están relacionados de modo tal que el objeto se comporta en ciertos aspectos como una unidad y no como un mero conjunto de elementos." (Bunge, 1980).

Al respecto Peter Checkland conceptualiza "sistema" de la siguiente manera: "La razón por la cual los sistemas no se conocen prontamente como una materia legítima es que difieren en tipo de la mayoría de las otras disciplinas. Su asunto no es un grupo particular de fenómenos, como la bioquímica, una materia en la sobre posición de temas ya existente. No es una disciplina que se deba poner en el mismo grupo que las otras: es una meta disciplina, cuya

materia sustancial se puede aplicar virtualmente dentro de cualquier otra disciplina” (Checkland, 1994, p. 70).

El concepto de sistemas actualmente es utilizado en todos los campos de la ciencia y ha penetrado en el pensamiento y el habla popular en los medios de comunicación de masas (Von Bertalanffy, 1995).

### **2.1.2. Modelo**

Podemos conceptualizar modelo como una representación abstracta de la realidad, una de las principales características de un modelo es mostrar las relaciones de causa y efecto entre los objetivos (Arbones Malisani, 1991). Aracil al respecto comenta: “Todo modelo de un sistema social debe omitir algunos detalles del mundo real que trata de modelar. La esencia de la construcción de modelos reside en la simplificación. Un modelo se construye para mejorar la comprensión de un cierto aspecto de la realidad, así como para hacer explícitas las implicaciones de las complejas relaciones que existen en el mundo real. Si el modelo fuese exactamente idéntico a la realidad, en todos sus aspectos, sería tan difícil de comprender como el propio mundo real y en consecuencia podría llegar a ser inútil” (Arancil, 1995, p. 56). Los modelos se usan para evaluar las posibles soluciones a un determinado problema, estas soluciones alternativas no se pueden comprobar en la realidad pues sería costoso y tomaría mucho tiempo<sup>3</sup>.

Los modelos que son más fáciles de resolver son también los más fáciles de comprender y aplicar. Sin embargo, si el modelo se simplifica hasta el punto en donde ya no representa el mundo real, proporciona resultados erróneos o engañosos.

Sobre la importancia de los modelos y su aplicación en la industria Eppen G.D. sobre la importancia de utilizar modelos en AT&T comenta: “Para tomar decisiones iniciales se

---

<sup>3</sup> Para la simulación de modelos matemáticos se usan métodos numéricos (Romero Flores, 2010)

utiliza información del perfil de crédito e informes crediticios que permiten pronosticar el futuro desempeño de un cliente en términos de pago. Se usa un modelo de optimización para determinar las fuentes de información de crédito procedente de distintas oficinas de crédito. Otro modelo de optimización determina las decisiones de aprobación y la asignación de líneas de crédito. En la toma de decisiones aprobatoria se consideran la exposición en dólares y la predicción de a la afiliación de crédito, y poder así determinar las decisiones de Aprobar, Rechazar o Remitir para Revisión. Con este procedimiento se automatiza actualmente cerca de 68% de las decisiones iniciales de crédito, permitiendo un incremento de \$40 millones en el volumen actual de negocios” (Eppen et al., 2000, p. 42). Por lo Incluso es tendencia en las grandes y más rentables contratar empleados con perfil en modelamiento, métodos numéricos e incluso minería de datos en este sentido Thomas H. Davenport incluso resalta: “Uso generalizado de modelos y optimización” (Davenport, 2011).

Uno de los aspectos más importantes a resaltar del modelamiento y que pretendemos abordar en la presente tesis es el análisis de sensibilidad es decir con ayuda del computador determinar un rango posible de soluciones que no sean las más óptimas pero que brinden resultados que sean positivos, al respecto podemos mencionar: “Uno de los objetivos más importantes sino el más importante de la modelación y simulación de sistemas es el análisis de sensibilidad es decir la capacidad del modelo para tomar decisiones y jugar con posibles alternativas” (Romero Flores, 2010).

Sobre construcción de modelos Donald Drew comenta: “La Ingeniería de sistemas aplicada se utilizan tres formas complementarias de construcción de modelos: verbal, gráfica y matemática. Los modelos verbales tienden a ser descripciones escritas o expresiones orales del fenómeno en cuestión. De forma explícita, reflejan las ideas implícitas de un modelo mental, y constituyen un medio esencial para mejorarlo. Los modelos gráficos están formados por diagramas que proporcionan un nexo de unión entre los modelos matemáticos y verbales,

por una parte, y el autor del modelo y su audiencia, por la otra” (Drew, 1995,15). Editor Claudius también considera el modelamiento como el mayor entendimiento del sistema a través de la imitación, el modelo debe imitar y mostrar propiedades del sistema real (Claudius Ptolemaeus, 2014).

### **2.1.3. Simulación**

La simulación es una técnica de experimentación en que se usan modelos lógico – matemáticos<sup>4</sup> con la finalidad de obtener posibles soluciones sobre modelos matemáticos (Romero Flores, 2010). Una definición a destacar es la de R.E. Shannon: "La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema" (Von Bertalanffy, 1995, p. 54).

### **2.1.4. Dinámica de sistemas**

La definición más concisa de dinámica de sistemas es la siguiente: “Ciencia que estudia el comportamiento de los sistemas dinámicos” (Arancil, 1995). Se le considera a J. Forrester, como padre de esta metodología, la misma que desarrolló durante la década de los cincuenta. La primera aplicación fue el análisis de la estructura de la empresa Sprague Electric. Esta empresa por la naturaleza de sus productos esperaba tener unas ventas constantes; sin embargo, sus ventas mostraban inexplicables oscilaciones que se asemejaban a servomecanismos compensados deficientemente (Arancil, 1995). En 1969 se publica la obra Dinámica Urbana, en la que se muestra como el modelamiento en base a Dinámica de Sistemas es aplicable a sistemas de ciudades (Forrester, 1970). En 1970, Forrester se une al Club de Roma, para

---

<sup>4</sup> Los modelos implementados mediante Dinámica de Sistemas se representan matemáticamente en base a ecuaciones diferenciales.

realizar la aplicación de la Dinámica de Sistemas en un estudio sobre el mundo, trabajo que fue el sustento para que Meadows y Meadows realicen el Informe al Club de Roma, que posteriormente se publicó con el nombre de Los límites del crecimiento que aborda principalmente los efectos del crecimiento poblacional y sus consecuencias para el mundo. (Meadows et al., 1972).

Jhon Sterman, resalta el avance de las teorías y métodos en la administración de operaciones, el comportamiento organizacional y los modelos dinámicos, métodos experimentales que introducen nuevos retos para la investigación de operaciones que es el énfasis que hace la Dinámica de Sistemas sobre el estudio de sistemas dinámicos no lineales que utilizan teorías de control para explicar problemas industriales (Sterman et al., 2015).

Jay. Forrester<sup>5</sup> basa la Dinámica de Sistemas en un paralelismo entre los sistemas dinámicos y uno hidrodinámico, constituido por depósitos, intercomunicados por canales con o sin retardos, variando mediante flujos su nivel<sup>6</sup>, estos tienen la influencia de variables exógenas que determinan la retroalimentación mediante relaciones causa-efecto (Arancil, 1995). Las variables que están dentro del sistema las denominaremos “variables endógenas” y a las variables que están fuera de los límites del sistema las denominaremos “variables exógenas” (Romero Flores, 2010), las relaciones de causa efecto entre el sistema y su medio ambiente son unidireccionales; sin embargo, las relaciones dentro del sistema se estructuran por bucles de retroalimentación que determina la fuerte dependencia entre los componentes (Sarabia, 1995). Los campos de aplicación de la dinámica de sistemas son muy variados. Por ejemplo: desarrollo de software, medicina, ecología, contaminación, problemas logísticos, producción e investigación de operaciones en general.

---

<sup>5</sup> Jay W. Forrester es profesor emérito de la escuela de administración Sloan del Massachusetts Institute of Technology (MIT) <http://mitsloan.mit.edu/>.

<sup>6</sup> La interacción de estos componentes se representa en diagramas de Forrester.

Z.Zhang y W.X.Lu usan la metodología de Dinámica de Sistemas y el proceso analítico jerárquico para desarrollar un modelo de simulación para el problema de transporte de agua, en el que identifican seis esquemas posibles de planificación para el estudio de los problemas de medio ambiente y ecología en la provincia de Jilin, las posibles tendencias fueron simuladas para los años 2008-2020 y los resultados mostraron que en el año 2020 habrá un índice de transporte de agua de 0.1819 si no cambia el modelo actual, se puede lograr un índice de transporte de 0.6652 el año 2020 si se aplica políticas de planeamiento que incluyan temas como: ahorro de agua, control de contaminación, explotación de agua y desarrollo económico. Los autores proponen con esta investigación una base científica para el desarrollo coordinado de economía social y ecología (Z.Zhang et al., 2014).

#### **2.1.5. Construcción de modelos en dinámica de sistemas**

Javier Aracil resalta que una cuestión importante para la construcción de modelos lo constituye la adecuada elección de las variables, establecer las relaciones y demás aspectos que conducen a un modelo final, aspectos que muchas veces son adquiridos con el buen criterio del ingeniero y la experiencia. En general las fases de construcción de un modelo son las siguientes (Arancil, 1995):

##### **1. Fase de conceptualización**

La fase de conceptualización se inicia con la familiarización del problema a estudiar, lo cual incluye la revisión bibliográfica al respecto, la opinión de expertos, experiencias propias, etc. Al respecto Aracil menciona: “Se trata de embeberse del problema en cuestión. Una vez hecho esto hay que definir con precisión los aspectos del problema que se quiere resolver y describirlos en forma precisa y clara” (Arancil, 1995). Y así de manera progresiva se van identificando los distintos elementos que forman el sistema, lo que conduce al establecimiento de los límites del sistema y a una descripción primaria de los bucles de realimentación. El diagrama causal del sistema se considera como resultado de esta fase.

## **2. Fase de formulación**

Una vez obtenido el diagrama causal del sistema se procede a la formulación del mismo para lo cual se utiliza un lenguaje formal lógico – matemático. Esta fase concluye: “cuando se dispone de un modelo del sistema bajo estudio en forma de ecuaciones programadas para ser pasadas por un computador” (Arancil, 1995), para el caso los diagramas de Forrester implementados conjuntamente con las ecuaciones que gobiernan su funcionamiento y la ayuda del computador es posible llevar a cabo diversas simulaciones que permiten depurar diferentes versiones del modelo (Romero Flores, 2010).

## **3. Fase de evaluación**

En esta fase se puede realizar el análisis de sensibilidad del modelo en razón del cual se extraen conclusiones en relación a las posibles modificaciones insertadas en los parámetros del modelo, los resultados de las múltiples simulaciones sin embargo deben ser consistentes para posteriormente elaborar recomendaciones en relación a cómo actuará el modelo a futuro<sup>7</sup>. “Una vez construido el modelo se procede a ensayar, por medio de convenientes simulaciones, las hipótesis sobre las que se ha construido el modelo así como la consistencia entre las mismas” (Arancil, 1995).

### **2.1.6. Sistema dinámico**

En el estudio de un sistema puede suceder que la característica fundamental que interese considerar sea su evolución en el tiempo y en concreto, como las interacciones entre las partes determinan esta evolución. El modelo del comportamiento dinámico de un sistema se denomina sistema dinámico. (Rodríguez-Candela, 2014).

De un determinado sistema real se puede obtener una colección de observaciones cuantitativas de atributos o propiedades del mismo. Si se considera el comportamiento

---

<sup>7</sup> Para validar el modelo se requiere de información histórica con la que se pueda contrastar el modelo.

dinámico, entonces de acuerdo a sus datos los sistemas dinámicos se caracterizan por cambiar en función del tiempo (Romero Flores, 2010). Otra característica importante de este tipo de sistemas es la presencia de mecanismos de retroalimentación por estar en constante relación con su medio ambiente, de acuerdo al comportamiento del sistema es posible conocer la estructura del sistema de retroalimentación, la cantidad de bucles de retroalimentación, su polaridad y orden (Drew, 1995).

### **2.1.7. Sistemas de producción**

Andrés Quijano define los sistemas de producción como: "... conjunto de actividades que un grupo humano (por ejemplo, la familia campesina) organiza, dirige y realiza, de acuerdo a sus objetivos, cultura y recursos, utilizando prácticas en respuesta al medio ambiente físico" (Quijano Ponce de León, 2009). Sobre estos sistemas los administradores de operaciones toman decisiones que se relacionan con la función de operaciones y los sistemas de transformación que utilizan, así mismo los sistemas de producción tienen la capacidad de involucrar las actividades diarias de logística. De esta definición se destaca:

- El conocimiento del sistema de producción se hace a través de sus componentes; sus procesos, los recursos que utilizan, la calificación del personal, etc.
- Es importante conocer la naturaleza de la organización, las funciones de cada personal y sus relaciones con los demás; como se distribuye el trabajo, la distribución de los costos y la contribución de las utilidades si es que se generan.
- Se debe entender el comportamiento del sistema de producción en el tiempo (Dinámica de Sistemas), la distribución de recursos a través del año, cuando se obtuvo la mayor utilidad y cuando se obtuvo pérdidas (Quijano Ponce de León, 2009).

Es entonces la producción de bienes o servicios uno de los objetivos más importantes de las organizaciones, la misma que debe ser medida por eficacia respecto al mercado para determinar si tiene utilidad, en los últimos años han aparecido técnicas de mejoramiento de la

competitividad de las organizaciones, al respecto Eduardo Oliva comenta: “los sistemas celulares de producción (SCP’s), constituyen uno de estos mecanismos y su objetivo principal ha sido el de proporcionar, a una empresa que fabrica por lotes medianos y pequeños, algunas de las ventajas de la producción en serie. En términos generales, los mecanismos de mejoramiento citados se pueden dividir en globales y específicos. Siendo los primeros los que impactan directamente a todas las áreas de la empresa, mientras que los segundos sólo afectan directamente a una o pocas áreas de esta (en ambos casos todas las áreas de la empresa resultan afectadas en forma directa). La producción celular corresponde a los mecanismos de tipo global, ya que implican un cambio sustancial en la forma de administrar la empresa” (Oliva López, 2009, p. 151).

#### **2.1.8. La dinámica de sistemas II – la quinta disciplina**

La evolución de la Teoría General de Sistemas aplicada a la empresa de hoy en día tiene un claro exponente actual en Peter Senge<sup>8</sup>, actual jefe del Centro de Aprendizaje Organizativo del Massachusetts Institute of Technology (MIT) con su aplicación de la Dinámica de Sistemas a la Empresa de acuerdo a modelos no lineales simulados por ordenador (Senge, 2004).

El equipo de Senge, confecciona estos modelos "cualitativos" identificando en las empresas conceptos escritos y mentales que la gente utiliza en la organización: normas y políticas de organización, la conducta real de la gente, la estructura organizativa, su propósito, y datos numéricos como cuántas personas trabajan y cuándo, con el objetivo de encontrar qué rizados forman esos elementos, metodología fácilmente aplicada por niños pero difícilmente entendida por las personas que actualmente llevan las riendas de las empresas, lo mismo que Senge resumen en lo siguiente: "Al principio los clientes son escépticos. No se puede elaborar un modelo de esto; esto no es sólo un sistema de variables duras. Estamos hablando de la

---

<sup>8</sup> Peter M. Senge es el director del Centro para el Aprendizaje Organizacional del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT).

innovación, de las pasiones humanas, de muchas cosas sutiles que no se pueden representar en un modelo. Al principio son cínicos, pero al cabo de un tiempo se entusiasman. Ven que se puede hacer un modelo de la psicología y la sutil dinámica de una organización. Descubren que si uno puede hablar claramente acerca de algo, habitualmente se puede realizar un modelo, así que se entusiasman con los modelos de dinámicas sutiles cuya importancia todos conocen." (Senge, 2004, p. 39).

Senge identifica las siguientes disciplinas de la organización inteligente:



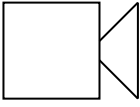

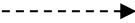
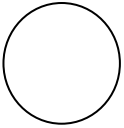
- Pensamiento sistémico.
- Dominio personal.
- Modelos mentales.
- Visión compartida.
- Aprendizaje en Equipo.

De estas disciplinas James Collins destaca la visión como un componente preponderante para que un proyecto o empresa logre el éxito e identifica como componentes de la visión, los siguientes: los valores esenciales y el objetivo esencial (Collins & Porras, 2000).

### **2.1.9. Diagramas de Forrester**

Los distintos elementos que constituyen el diagrama causal de un sistema se representan por medio de variables, las cuales se clasifican en: variables de nivel, variables de flujo y variables auxiliares. Este método gráfico desarrollado por Jay Forrester es muy utilizado para el estudio de sistemas socio-económicos (Sarabia, 1995), la topología de estos diagramas es la siguiente:

**Tabla 1***Topología de diagramas de Forrester*

Símbolo	Nombre	Descripción
	Nube	Representa una fuente o un pozo, pueden interpretarse como una variable de nivel que es inagotable.
	Nivel	Representa una acumulación de un flujo.
	Flujo	Variación de un nivel, representa un cambio en el estado del sistema.
	Canal de material	Canal de transmisión de una magnitud física que se conserva.
	Canal de información	Información que no es necesario que se conserve.
	Variable auxiliar	Cantidad con significado físico en el mundo real.

### 2.1.10. Sistemas de producción de los proyectos de riego en Plan Meriss Inka

Coherentes con la Visión Institucional de lograr una agricultura regional bajo riego, moderna, competitiva y sostenible, el PEPMI ejecuta un programa integral de Sistemas de Gestión y Producción en Proyectos de Riego (GPSR), con los siguientes ejes de trabajo (GPER-Inka, 1995):

- Fortalecimiento de las organizaciones de riego.
- Manejo del sistema de riego.

- Riego parcelario y manejo de cultivos.
- Conservación y protección de la infraestructura de riego y suelos.

La fortaleza de la estrategia de trabajo institucional para el logro de los objetivos de GPSR reside en el enfoque participativo Proyecto - Usuario<sup>9</sup>, la principal metodología para la transferencia del conocimiento tecnológico de riego son los concursos y la capacitación horizontal de campesino a campesino (Kamayoc = Tecnólogos Andinos de Riego).

Con el trabajo mencionado finalmente se pretende reducir la pobreza rural, elevar el familiar campesino y contribuir al crecimiento económico de largo plazo en las Regiones de Cusco y Apurímac.

### **1. Precisando resultados de ejecución de proyectos de riego**

Según precisa el Ing. Eulogio Huaman, Responsable de la oficina de Monitoreo y Evaluación del PEPMI: “Los campesinos o pequeños agricultores; evidentemente valoran los costos, beneficios y las oportunidades adicionales que puede generar un proyecto, en función de ello se involucran en los procesos de proyectos” (Nieto Degregori, 1995); Pero, en los últimos años se observa que tal involucramiento responde a 2 orientaciones, una de ellas estaría dado a que las motivaciones de participación en el proyecto obedecen a demandas propias para generar beneficios adicionales sostenibles en base al trabajo y uso de sus recursos de manera más eficiente y creativo; la otra orientación que puede considerarse una grave distorsión está referido a que el involucramiento de campesinos en un proyecto obedece a beneficios fáciles e inmediatos generados por el asistencialismo que les enrumba a una dependencia excesiva disminuyendo sus capacidades para su auto desarrollo duradero y haciéndoles más vulnerables a las influencias y manipulaciones externas.

---

<sup>9</sup> En los años de funcionamiento de Plan Meriss se ha observado que los usuarios sólo utilizan la infraestructura de riego en la que participan en su construcción.

Considerando que estas 2 orientaciones no podrían ser ajenas en los procesos de desarrollo de proyectos de riego por Plan MERISS, se debe señalar que en el transcurso de su actuación en el pasado y en función de los éxitos o fracasos; la Institución aprendió y actualmente aplica algunos enfoques y estrategias que es necesario sintetizarlo en lo siguiente (GPER-Inka, 1995):

- Ejecución focalizada de proyectos de riego, en base a priorización de zonas que tengan potencialidades reales.
- Involucramiento efectivo de los agricultores en todos los procesos de los proyectos no solo como actores pasivos, sino principalmente en procesos de toma de decisiones y ejecución compartida de las medidas y acuerdos establecidas en el contexto del proyecto. En los últimos proyectos como es el caso de Pachachaca, las condiciones de los aportes acordados antes del inicio de ejecución de obra fueron de: 70% la financiera KFW de Alemania, 20% Tesoro Público y 10% aporte directo de usuarios; los cuales fueron logrados satisfactoriamente.
- Diseño y ejecución de las obras de riego considerando las características y comportamientos físicas de la zona y de operación y mantenimiento futuro por parte de los usuarios.
- Ejecución de procesos de capacitación/comunicación utilizando métodos flexibles efectivos que movilizan conocimientos y prácticas de manera interactuada entre agricultores, técnicos y líderes tecnológicos quienes viabilizan las propuestas mejoradas.

### **2.1.11. El cálculo diferencial**

#### **1. La derivada**

Se considera a Newton como el padre del cálculo infinitesimal o diferencial, esta teoría se utiliza hasta nuestros días para la interpretación de fenómenos físicos, químicos,

económicos, etc. que pueden ser representados por ecuaciones matemáticas. La derivada puede interpretarse como la razón de cambio o “en forma geométrica como la pendiente de una curva, y físicamente, como la razón de cambio. Las derivadas se pueden utilizar para representar de todo, desde fluctuaciones en las tasas de interés hasta la mortalidad de los peces” (Hughes-Hallet et al., 2009).

Entonces se debe considerar la razón de cambio en un punto determinado de una función necesarios para (Mitacc y Toro Mota, 2010):

- Determinar la ecuación de la recta tangente a una curva en un determinado punto.
- Dado el movimiento de una partícula perteneciente a una recta, entonces:  $s = f(t)$  es la ecuación de la partícula sobre la recta en un instante  $t$ , lo cual podemos escribir:

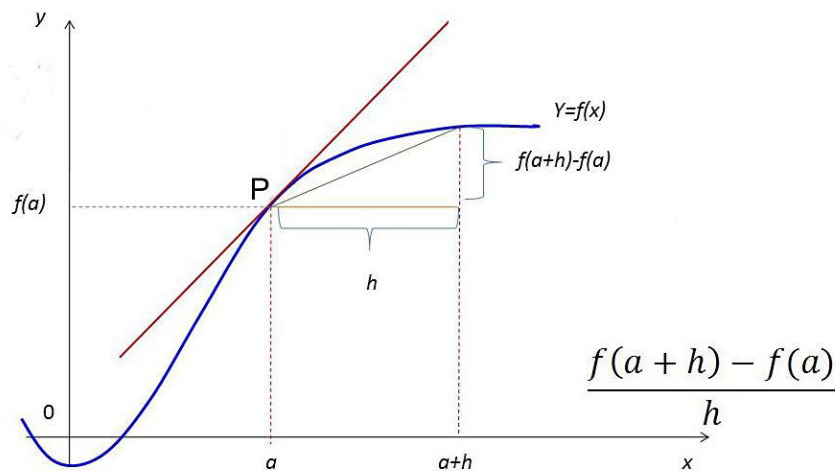
$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

Entonces podemos definir a la derivada de la siguiente forma:

Definición 1: Sea  $f: R \rightarrow R$  una función definida en el punto  $a$  entonces  $f$  es derivable en  $a$ , si el límite:

$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad \dots(2.1)$$

Existe y es finito, la notación  $f'(a)$  se da debido a LaGrange, también puede escribirse:  $\frac{df(a)}{dx}$ , cuya interpretación geométrica se interpreta como la pendiente de la recta tangente a la curva en un punto determinado, como se muestra en la figura 2.1., donde P es el punto tangente.

**Figura 1***Interpretación geométrica de la derivada*

En el siguiente ejemplo se puede observar la interpretación de la derivada en base a límites.

Ejemplo 2.1: Hallar la derivada de la función  $f(x) = 1/x$  en base a límites.

Solución: De la definición de límites tenemos:

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad \dots(2.2)$$

Reemplazando  $f(x) = 1/x$  en (2.3)

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1/(x+\Delta x) - 1/x}{\Delta x}$$

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{(x+\Delta x)} - \frac{1}{x}}{\Delta x} \cdot \frac{x(x+\Delta x)}{x(x+\Delta x)}$$

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{(x+\Delta x)} - \frac{1}{x}}{\Delta x} = \frac{x - (x+\Delta x)}{x(x+\Delta x)} \cdot \frac{x(x+\Delta x)}{x(x+\Delta x)} = \frac{-\Delta x \cdot x(x+\Delta x)}{\Delta x \cdot x(x+\Delta x)}$$

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{-\Delta x}{\Delta x \cdot x(x+\Delta x)} \quad \dots(2.3)$$

Simplificando y reemplazando  $\Delta x = 0$  en (2.3)

$$f'(x) = \frac{-1}{x^2} \quad \dots(2.4)$$

Ejemplo 2.2: Hallar la ecuación de la recta tangente a la función  $f(x) = 1/x$  en el punto  $x = 2$ .

Solución: Reemplazamos  $x = 2$  en la ecuación (2.4).

$$f'(2) = \frac{-1}{4} = m$$

De esta forma hallamos la pendiente de la recta en el punto  $x = 2$ .

Tomando en cuenta la ecuación de la recta:

$$y - y_0 = m(x - x_0) \quad \dots(2.5)$$

Donde  $f(x_0, y_0) = (2, \frac{1}{2})$ ; reemplazando en (2.5)

$$y - \frac{1}{2} = \frac{-1}{4}(x - 2)$$

$$y = 1 - x$$

## 2. Valores máximos y mínimos de una función

Del ejemplo 2.2 podemos concluir que una aplicación de la derivada es la determinación de puntos óptimos de una función (máximos o mínimos), los mismos que se dan principalmente en los puntos sobre la función donde la pendiente de la recta tangente a la curva es igual a 0 (cero). Es importante mencionar que algunas funciones tienen valores máximos o mínimos absolutos sobre un intervalo y otras no.

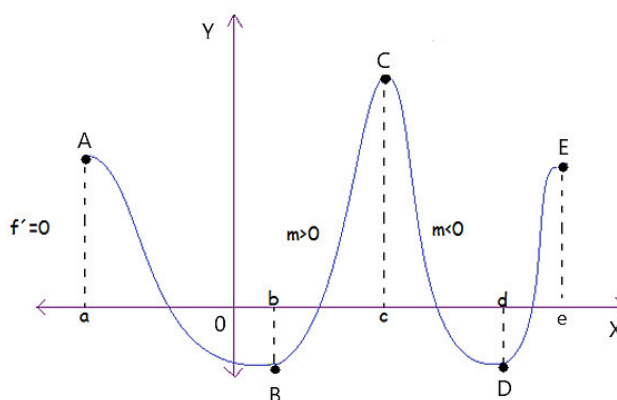
Consideremos una función continua en el intervalo cerrado  $[a, e]$ . De la figura 2.2, se observa que el punto C es el más alto de la curva en  $x=a$  hasta  $x=d$ , y el punto D es el más

bajo; por tanto el punto C que es  $f(c)$ , le denominaremos máximo absoluto y el punto D que es  $f(d)$ , le denominaremos mínimo absoluto; los puntos A y E que son  $f(a)$  y  $f(e)$ , les denominaremos máximos relativos y al punto B que es  $f(b)$ , le denominaremos mínimo relativo, a estos puntos se les denomina extremos de una función (Espinoza Ramos, 2009).

A los puntos que se observan en la figura 2.2 también se les denomina puntos críticos, que se obtienen de obtener los valores de  $x$  que satisfacen:  $f'(x) = 0$ ; estos valores de  $x$  deben ser reemplazados en  $f(x)$ , los valores que resulten determinarán los máximos absolutos, relativos y los mínimos absolutos y relativos. Una segunda derivada positiva en el punto  $x = a$  indica que la función es convexa en ese punto y una segunda derivada negativa en  $x = a$  indica que la función es cóncava en ese punto.

**Figura 2**

*Máximos y mínimos de una función*



Definición: sea  $f(d)$  es un valor máximo relativo es un máximo relativo de una función  $f$  si existe el intervalo abierto  $\langle d - \delta, d + \delta \rangle$  para  $\delta > 0$  tal que  $f(x)$  está definida y  $f(x) \leq f(d), \forall x \in \langle d - \delta, d + \delta \rangle$  (Espinoza Ramos, 2009).

Teorema: sea la función  $f$  que es continua en un intervalo  $\langle a, e \rangle$  y sea  $d \in \langle a, e \rangle$  si  $f(d)$  es un extremo relativo de  $f$ , entonces  $f'(d) = 0$  o  $f'(d) \nexists$  (Espinoza Ramos, 2009).

### 2.1.12. Teoría de optimización clásica

En la teoría de optimización clásica se usa las técnicas de cálculo diferencial para hallar los máximos y mínimos (puntos críticos) para funciones objetivos, técnicas que son utilizados para los algoritmos de la programación lineal, entre los métodos más usados están: hessiano para extremos no restringidos; jacobiano y lagrangiano para problemas con restricciones de igualdad y Kuhn-Tucker para problemas con restricciones de desigualdad (Taha, 2004).

#### 2.1.12.1. Problemas no restringidos

Sea una función de tres variables  $z = f(x_1, x_2, x_3)$  y sean sus derivadas parciales  $f_1, f_2$  y  $f_3$ , sus derivadas parciales segundas denotadas por:  $f_{ij} = (\partial^2 z / \partial x_i \partial x_j)$ ; donde:  $i, j = 1, \dots, n$ ; es importante recordar que según el teorema de Young. Entonces para obtener los puntos críticos de  $z$  es necesario que  $dz = 0$ , siendo  $dz = f_1 dx_1 + f_2 dx_2 + f_3 dx_3$ ; por lo tanto para si  $dz = 0$  debe cumplirse  $f_1 = f_2 = f_3 = 0$ ; El tipo de punto crítico se determinará según cuadro 2.2 (Canovas et al., 2010)

**Tabla 2**

*Condiciones para determinar óptimos de puntos críticos*

Condición	Máximo	Mínimo
Primer Orden	$f_1 = f_2 = \dots = f_n = 0$	$f_1 = f_2 = \dots = f_n = 0$
Segundo Orden	$ H_1  < 0;  H_2  > 0;  H_3  < 0; \dots$	$ H_1 ,  H_2 , \dots,  H_n  > 0$
Orden	$; (-1)^n  H_n  > 0$	

Donde:  $|H_n|$  es el determinante de la matriz Hessiana.

#### 2.12.2.2. Problemas restringidos

##### A. Restricciones de igualdad

Sea a función objetivo Maximizar  $f(x_1, x_2)$ , sujeto a  $g(x_1, x_2) = k$ (constante); para encontrar la solución se formula la función F formada por:

- Establecer la restricción igual a 0.
- Multiplicando por  $L$  (multiplicador de Lagrange).
- Sumando el producto a la función original.

$$F(x_1, x_2, \lambda) = f(x_1, x_2) + L[k - g(x_1, x_2)]$$

Esta función es denominada función Lagrangiana, los valores críticos  $x_0, y_0$  y  $\lambda_0$  son obtenidos tomando las derivadas parciales de  $F$  con respecto a cada una de las variables e igualándolas a cero, de la siguiente forma (Taha, 2004):

$$\frac{\partial F(x_1, x_2, \lambda)}{\partial x_1} = 0$$

$$\frac{\partial F(x_1, x_2, \lambda)}{\partial x_2} = 0$$

$$\frac{\partial F(x_1, x_2, \lambda)}{\partial \lambda} = 0$$

Posteriormente se resuelve el sistema de ecuaciones resultante.

#### - **Hessiano Orlado.**

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones de la función Lagrangiana para determinar si los puntos críticos son máximos o mínimos se construye el Hessiano Orlado en el que participa la función  $F$  y la restricción  $g$ , cuya forma es (Chase et al., 2009):

$$|\bar{H}| = \begin{vmatrix} 0 & g_1 & g_2 & \dots & g_n \\ g_1 & F_{11} & F_{12} & \dots & F_{1n} \\ g_2 & F_{21} & F_{22} & \dots & F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g_n & F_{n1} & F_{n2} & \dots & F_{nn} \end{vmatrix}$$

Donde las matrices Hessianas orladas menores serán:

$$|\bar{H}_2| = \begin{vmatrix} 0 & g_1 & g_2 \\ g_1 & F_{11} & F_{12} \\ g_2 & F_{21} & F_{22} \end{vmatrix}$$

$$|\overline{H}_3| = \begin{vmatrix} 0 & g_1 & g_2 & g_3 \\ g_1 & F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ g_2 & F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ g_3 & F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{vmatrix}$$

Y así sucesivamente hasta el valor de n.

**Tabla 3**

*Condiciones para determinar óptimos de puntos críticos con matriz Hessiana Orlada*

Condición	Máximo	Mínimo
Primer orden	$F_L = F_1 = F_2 = \dots = F_n = 0$	$F_L = F_1 = \dots = F_n = 0$
Segundo orden	$ \overline{H}_2  > 0;  \overline{H}_3  < 0;  \overline{H}_4  > 0; \dots$ $; (-1)^n  \overline{H}_n  > 0$	$ \overline{H}_2 ,  \overline{H}_3 , \dots,  \overline{H}_n  < 0$

## B. Restricciones con desigualdad

Algunas funciones requieren de condiciones de desigualdad, por ejemplo, cuando se desea maximizar una función objetivo sujeta a restricciones de “no más de”, o minimizar una función objetivo sujeta a “no menos que”; en estos casos se utiliza la programación cóncava, un tipo de programación no lineal diseñada para optimizar funciones con restricciones de desigualdad (Otero et al., 2006).

Maximizar:  $f(x_1, x_2)$

Sujeto a:  $g(x_1, x_2), \quad \forall x_1, x_2 \geq 0$

Así la función Lagrangiana correspondiente será:

$$F(x_1, x_2, \lambda) = f(x_1, x_2) + \lambda g(x_1, x_2)$$

Para determinar las condiciones de maximización se deben cumplir las condiciones de Kuhn-Tucker.

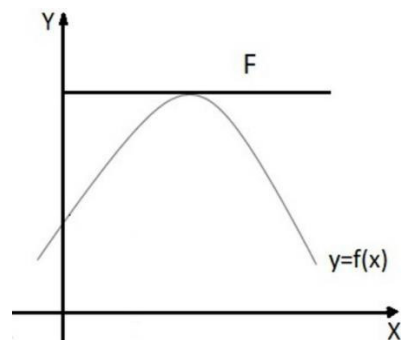
$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = f_j(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \bar{L}g_i(\bar{x}_1, \bar{x}_2) \leq 0; \forall x_i \geq 0; \text{ siendo: } \bar{x}_i \frac{\partial F_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda} = g(\bar{x}_1, \bar{x}_2) \geq 0; \forall \bar{L} \geq 0; \text{ siendo: } \bar{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \lambda} = 0$$

Para cumplir las condiciones Kuhn Tucker las restricciones deben ser mayor o igual a cero, donde se pueden dar las siguientes condiciones:

**Figura 3**

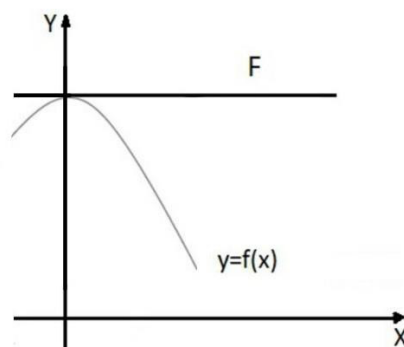
*Condición de Kuhn Tucker*



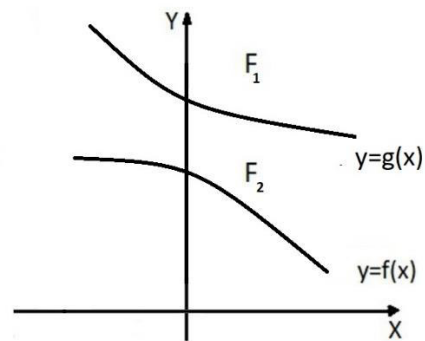
Para la figura 3 el máximo en F, una solución interior será:  $f'(x) = 0$  y  $x > 0$

**Figura 4**

*Condición de Kuhn Tucker*



Para la figura 4 el máximo en F, una solución de frontera:  $f'(x) = 0$  y  $x = 0$

**Figura 5***Condición de Kuhn Tucker*

Para la figura 2.5 el máximo en  $F_1$  o  $F_2$ , una solución de frontera:  $f'(x) < 0$  y  $x = 0$

De manera general para un máximo en el primer cuadrante se puede resumir como:  $f'(x) \leq 0$  ;  $x \geq 0$  y  $xf'(x) = 0$ ; todas estas condiciones son conocidas como “condiciones Kuhn Tucker”, estas condiciones excluye un punto I en el segundo cuadrante, pues  $f'(I) > 0$  además que si  $xf'(x) = 0$ ; indica que uno de los factores debe tomar ser cero. Por lo que el problema se centra en probar las siguientes posibilidades (Otero et al., 2006):

$$\lambda > 0 ; x > 0 ; y > 0$$

$$\lambda > 0 ; x = 0 ; y > 0$$

$$\lambda > 0 ; x > 0 ; y = 0$$

$$\lambda > 0 ; x = 0 ; y = 0$$

$$\lambda = 0 ; x > 0 ; y > 0$$

$$\lambda = 0 ; x = 0 ; y > 0$$

$$\lambda = 0 ; x > 0 ; y = 0$$

$$\lambda = 0 ; x = 0 ; y = 0$$

### 2.12.3. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos (ag) son utilizados ampliamente utilizados en problemas de optimización, Kuri Ángel los define como: “métodos heurísticos de búsqueda inspirados en lo que sabemos acerca del proceso de la evolución natural. Si la naturaleza ha sido capaz de generar organismos óptimos para desempeñarse en medios ambientes sumamente complejos, por qué no copiar sus métodos para resolver nuestros propios problemas y tratar de encontrarles soluciones que, de alguna manera, sean óptimas” (Kuri & Galaviz, 2002, p. 47).

Los algoritmos genéticos fueron introducidos en el campo de las ciencias de la computación por Jhon Henry Holland en sus libros sobre sistemas complejos adaptativos en la Universidad de Michigan, a Holland también se le reconoce como el padre de los sistemas adaptativos. Los algoritmos genéticos se aplican a problemas con un número inmenso de soluciones posibles como por ejemplo maximizar una función de varias variables, que podría ser la utilidad de una empresa, la misma que podría expresarse de la siguiente forma:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = 50x_1 + x_2^2 - 0.8x_3^2 + 20x_4$$

Las variables  $(x_1, x_2, x_3, x_4)$  pueden asumir los valores en un rango de:  $[-4999 a 5000]$ , lo cual son 10000 posibilidades para cada variable, lo que en total sería  $10000^4 = 10^{16}$ , si cada operación demoraría  $1/10$  billonésimo de segundo  $10^{-10}$  segundos; además que se debe considerar que la función de evaluación tiene 100 operaciones, entonces cada evaluación demorará  $10^{-8}$  segundos. Por lo tanto evaluar todas las posibles soluciones demorará  $10^{16}/10^8 = 100\ 000\ 000,00$  segundos (03 años) para hallar todas las soluciones posibles y por ende el máximo global de la función (Prendes Gero et al., 2006).

### **2.12.3.1. Características de los algoritmos genéticos**

El mecanismo de los algoritmos genéticos está inspirado en la evolución de las especies biológicas a través de los mecanismos de la herencia y sus mecanismos para generar los individuos más fuertes y las posibles mutaciones que se presenten.

Para proveer una solución a un problema específico se utiliza una estructura tipo cromosoma (molécula formada por una larga cadena de ADN conformada por adenina (A), guanina (G), citosina(C) y timina (T)) sobre esta se aplican operadores de recombinación para mantener la información hereditaria crítica y la aplicación de operadores generan una población para un “espacio de búsqueda” que está constituido por una población, individuos y operadores de cruzamiento (Prendes Gero et al., 2006).

#### **A. Población**

Conjunto de posibles soluciones, donde la población inicial puede ser generada aleatoriamente y que va a cambiar en el tiempo, pero su tamaño se mantiene, al respecto Kuri y Galaviz comentan: “Una vez calificados todos los individuos de una generación, el algoritmo debe, al igual que lo hacen la naturaleza y el hombre, seleccionar a los individuos más calificados, mejor adaptados al medio, para que tengan mayor oportunidad de reproducción. De esta forma se incrementa la probabilidad de tener individuos "buenos" (con alta calificación) en el futuro” (Kuri & Galaviz, 2002, p. 65).

#### **B. Individuo**

Elemento de una población, el mismo que es representado por una cadena de caracteres, sobre el cual se realizarán operaciones sobre la información binaria. Una vez creada la población inicial a cada individuo se le aplica la función “fitness”, para evaluar y seleccionar a los individuos mejor adaptados o que brinden las mejores soluciones para el problema de

optimización, el resto de individuos son descartados. Al conjunto de individuos mejor adaptados se le denomina “generación intermedia” (Kuri & Galaviz, 2002).

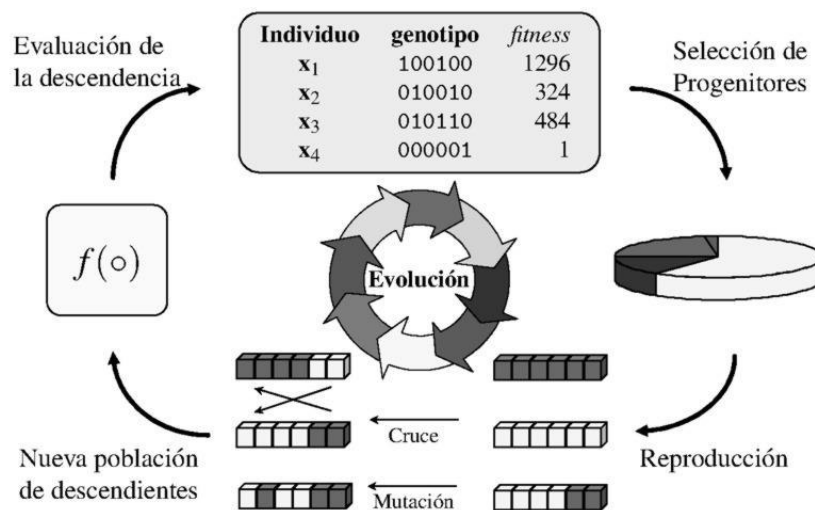
### C. Cruzamiento

Haciendo referencia al proceso biológico que inspira este tipo de algoritmos podemos mencionar: “Durante la meiosis ocurre el proceso de producción de gametos. El código genético de los padres de un individuo se mezcla para producir gametos cuyo contenido genético es híbrido, es decir, una mezcla. De esta manera es posible que un individuo herede a sus descendientes las características mezcladas de sus propios padres” (Kuri & Galaviz, 2002, p.81).

En algoritmos genéticos el cruzamiento o reproducción consiste en que, de dos individuos según su grado de adaptación, van a mezclar sus códigos genéticos para generar hijos, esto se puede hacer eligiendo un punto aleatorio del individuo e intercambiando sus partes. El funcionamiento de los algoritmos genéticos se observa en la figura 6; y su funcionamiento se explica en el pseudocódigo 2.1.

**Figura 6**

*Funcionamiento de algoritmos genéticos*



Los algoritmos genéticos se aplican en distintos campos, dentro de ellos podemos mencionar: control industrial, diseño industrial, optimización de recursos, robótica, aprendizaje de máquinas, juegos, etc.

### **Pseudocódigo 2.1.**

#### *Algoritmo genético*

```

Procedimiento Algoritmo Genético

Inicio (1)

    t = 0;

    inicializar P(t);

    evaluar P(t);

Mientras (no se cumpla la condición de parada) hacer

Inicio (2)

    t = t + 1

    seleccionar P(t) desde P(t-1)

    recombinar P(t)

```

## **2.2. Marco conceptual**

### **2.2.1. Sistema**

"Complejo de elementos interactuantes. Interacción significa que elementos, p, están en relaciones, R, de suerte que el comportamiento de un elemento p en R es diferente de su comportamiento en otra relación R'. Si los comportamientos en R y R' no difieren, no hay interacción, y los elementos se comportan independientemente con respecto a las relaciones R y R'" (Von Bertalanffy, 1995, p.37).

### **2.2.2. Sistema dinámico simple**

“Estructuras con movimientos necesarios y predeterminados. Pueden decirse que es el nivel de relojería. El objeto “no es más” solamente (sólo, únicamente), el hace (o mejor interviene) y lo conocemos por su actividad. A este nivel se le puede representar como una caja negra que contiene principalmente una flecha de entrada y una flecha de salida. Se le llama frecuentemente procesador” (Arbones Malisani, 1991, p.17).

### **2.2.3. Modelo**

“Un modelo es una abstracción de la realidad que captura la esencia funcional del sistema, con el detalle suficiente como para que pueda utilizarse en la investigación y experimentación en lugar del sistema real, con menos riesgo, tiempo y coste” (Drew, 1995).

### **2.2.4. Simulación**

"Muestra como los modelos se comportan en un ambiente en particular. La simulación es una forma de análisis y diseño; su meta es dar una idea de las propiedades del diseño y habilitar la evaluación del diseño" (Claudius Ptolemaeus, 2014).

### **2.2.5. Dinámica de sistemas**

“De acuerdo con esta metodología es siempre posible representar cualquier proceso de tipo de flujo, no importa cuál sea la naturaleza de éste, por medio de una red o grafo cuyos nodos o vértices son procesadores elementales y cuyos arcos representan las conexiones e interrelaciones que aseguran los flujos entre los diferentes procesadores que garantiza que el sistema sea activo y que sus diferentes subsistemas evolucionen simultáneamente” (Sarabia, 1995, p.85).

### **2.2.6. Fase de conceptualización**

“Se trata de empaparse del problema en cuestión. Una vez hecho esto hay que definir con precisión los aspectos del problema que se quiere resolver y describirlos en forma precisa y clara” (Arancil, 1995).

### **2.2.7. Fase de formulación**

“Consiste en primer lugar en el establecimiento del diagrama de Forrester a partir del cual se escriben las ecuaciones del modelo que pueden escribirse en lenguaje Dynamo o en cualquier otro lenguaje que permita pasarlas por un computador” (Arancil, 1995).

### **2.2.8. Fase de evaluación**

“Una vez construido el modelo se procede a ensayar, por medio de convenientes simulaciones, las hipótesis sobre las que se ha construido el modelo, así como la consistencia entre las mismas” (Arancil, 1995).

### **2.2.9. Sistemas de producción**

“... conjunto de actividades que un grupo humano (por ejemplo, la familia campesina) organiza, dirige y realiza, de acuerdo a sus objetivos, cultura y recursos, utilizando prácticas en respuesta al medio ambiente físico” (Quijano Ponce de León, 2009).

### **2.2.10. Diagramas de Forrester**

Los distintos elementos que constituyen el diagrama causal se representan por medio de variables, las cuales se clasifican según los siguientes: variables de nivel, variables de flujo y variables auxiliares. Este método gráfico desarrollado por Jay Forrester es muy utilizado para el estudio de sistemas socio-económicos (Arancil, 1995).

### **2.2.11. Sistemas de producción de los proyectos de riego en Plan Meriss Inka**

Coherentes con la Visión Institucional de lograr una agricultura regional bajo riego, moderna, competitiva y sostenible, el Proyecto ejecuta un programa integral de Sistemas de Gestión y Producción en Proyectos de Riego (GPSR), con los siguientes ejes de trabajo: fortalecimiento de las organizaciones de riego, manejo del sistema de riego, riego parcelario y manejo de cultivos, conservación y protección de la infraestructura de riego y suelos (GPER-Inka, 1995).

### **2.2.12. Teoría de optimización clásica**

“La teoría de optimización clásica usa el cálculo diferencial en la determinación de los puntos máximos y mínimos (extremos) para funciones con y sin restricciones. El método tal vez no sea el adecuado para cálculos numéricos eficientes. Sin embargo, la teoría que lo fundamenta proporciona las bases para diseñar la mayor parte de los algoritmos de programación lineal” (Taha, 2004, p.745).

### **2.2.13. Algoritmo genético.**

“métodos heurísticos de búsqueda inspirados en lo que sabemos acerca del proceso de la evolución natural. Si la naturaleza ha sido capaz de generar organismos óptimos para desempeñarse en medios ambientes sumamente complejos, por qué no copiar sus métodos para resolver nuestros propios problemas y tratar de encontrarles soluciones que, de alguna manera, sean óptimas” (Kuri & Galaviz, 2002, p.15).

## **2.3. Aspectos de responsabilidad social y medio ambiental**

La reivindicación del poblador andino y el acceso a la riqueza son temas que atañen al Perú como estado, el dinero del tesoro Público que debe ser destinado a cerrar la brecha de pobreza es un tema importante. Por tanto, con la presente tesis se formula técnicas numéricas y heurísticas para la lograr la optimización del proceso productivo agrícola y de esta manera

difundir estas metodologías en proyectos de impacto social. Entre los aportes presentados se debe resaltar la información que requiere ser sistematizada por las instituciones para la elaboración eficiente de los modelos de simulación y optimización.

Según el informe Técnico del INEI “Evolución de la pobreza monetaria 2007-2018“. En el periodo del año 2007 al 2018 el porcentaje de pobreza ha disminuido de 74% a 42.1% en la población de zona rural, pero es todavía tres veces más que el área urbana 14,4% (INEI, 2019). Estas cifras demuestran que todavía existe una brecha en el reparto de riqueza en desmedro de los pobladores andinos principalmente.

¿Es mucho el esfuerzo para erradicar la pobreza? Al respecto, Juan Gonzales comenta que es principalmente problema de decisión política. Enfáticamente comenta: “Si se ha salvado al sistema financiero a escala mundial, y en México se rescató al sistema bancario, nos cuestionaremos sobre la posibilidad de ayudar también a los pobres. Su costo es mucho menor que lo que se ha aportado a los grandes consorcios financieros, y en términos financieros, arrojan mayor rentabilidad, en la medida en que son parte de la demanda agregada” (González Bermúdez, 2013). Por lo que la presente tesis es un aporte para que más profesionales se involucren en temas multidisciplinarios para la solución de problemas complejos como la producción agrícola en los Andes peruanos y por ende se mejore la calidad de vida del poblador andino.

A esto debemos sumar la necesidad de proponer modelos y metodologías que hagan que la inversión estatal no se pierda y los proyectos logren sostenibilidad en el tiempo, pese a los diversos problemas que surgen como son los conflictos sociales ocasionados por la minería (Córdova Huamán, 2019).

El uso adecuado (óptimo) de los recursos agua y suelo, los cuales en la presente tesis necesitan ser cuantificados adecuadamente y de esta manera se proporciona métodos adecuados

para el cuidado del medio ambiente y sus recursos no renovables. Al respecto, la organización Greenpeace resalta: “No se requieren más que algunas cifras para ver que algo no anda bien: casi mil millones de personas duermen con hambre todas las noches y, al mismo tiempo, el mundo produce suficiente comida para alimentar a los más de siete mil millones de personas que hay en todo el mundo. Cerca de mil millones de personas padecen obesidad o sobrepeso, un impactante 30% de la comida mundial se desperdicia” (Tirado & Greenpeace, 2015). Entonces es necesario “optimizar” nuestros recursos para asegurarnos un futuro.

#### **2.4.Marco Filosófico**

La presente tesis se encuadra dentro del marco filosófico del pensamiento de sistemas que requiere de métodos sintéticos cuyo principal exponente es el reduccionismo. Estos métodos han demostrado ser útiles para resolver problemas socio-técnicos complejos y que complementan, pero no niegan la existencia de métodos analíticos representados principalmente por el reduccionismo y utilizados ampliamente por las ciencias físicas y biológicas (Arancil, 1995).

La importancia e interacción del reduccionismo (análisis) y el extensionismo (síntesis) así como su importancia Ackoff las relata en periodos históricos de la humanidad, los cuales denomina como: la edad de la máquina, la revolución industrial, la edad de los sistemas y la revolución postindustrial. (Ackoff, 1995).

Mario Bunge uno de los más reputados autores sobre temas de “epistemología” o también conocidos como la filosofía de las ciencias; sin embargo, defiende y considera el uso análisis como principal base del método científico y crítica y duda del uso de la síntesis como generador de conocimiento que difunde Checkland en sus textos de pensamiento sistémico que incluye a la “sinergia” como una característica y que establece que el todo es mayor que la suma de sus partes o que también se puede explicar que un sistema presenta características

funcionales y estructurales, argumentos que a Mario Bunge le parece discutible (Bunge, 1980) (Checkland, 1994). Lo que debe resaltarse; sin embargo, es que los principales defensores del pensamiento de sistema sostienen que la síntesis no reemplaza al análisis ni viceversa, sino que ambos se complementan. En todo caso toca a Peter Senge refutar a Mario Bunge en su obra “La Quinta Disciplina” pues explícitamente menciona que en la mayoría de los proyectos que han fracasado se advierte la falta del pensamiento de sistemas. En su obra Peter Senge resalta la importancia de la aplicación del pensamiento de sistemas y por ende del método sintético en las organizaciones para su correcto funcionamiento. Aunque Senge menciona la importancia de Jay Forrester y su Dinámica de Sistemas, no considera necesario la aplicación de métodos y modelos numéricos, sino, que se entienda la relación del sistema como parte de un todo mayor y los mecanismos de retroalimentación que existen entre el sistema y los límites del sistema.

Peter Senge también recomienda que el pensamiento de sistemas debe convertirse en una innovación tecnológica para las organizaciones (Senge, 2004). Al respecto es importante destacar la importancia de la innovación tecnológica para el desarrollo de las sociedades de manera que la ciencia cumpla uno de sus objetivos más filantrópicos cual es: mejorar las condiciones de vida de la humanidad.

La presente tesis también es una muestra del complemento sinérgico de la síntesis y el análisis para la solución de problemas complejos, pues de acuerdo al estudio de los proyectos de mejoramiento de riego implementados por Plan Meriss Inka se ha visto que los proyectos ejecutados en la provincia de Chumbivilcas Espinar a mediano plazo generaron un fenómeno de recesión económica regional después de algunos años de bonanza económica. Como diagnóstico del problema suscitado se llegó a la conclusión la necesidad de realizar estudios de mercado adecuados; es decir, no se consideró que estos proyectos estaban dentro de un sistema mayor cuyo factor predominante es el “mercado”. Asimismo, para la validación del modelo a través del proceso de simulación se han elaborados modelos matemáticos como de mercado,

precio, etc., los mismo que también cumplen los requisitos que exige Mario Bunge, es decir, la utilización de un lenguaje formal para la generación de conocimiento esto dentro de un marco filosófico.

Mario Bunge sobre filosofía comenta que, si esta se actualiza con la ciencia, entonces la influencia sobre la ciencia deberá ser positiva, y ayudará a que la ciencia se actualice y valide. Lo contrario a un comportamiento dogmático de la filosofía en la que sólo se dedica a dar por cierto las teorías y conceptos y solo las repite. Entonces podemos comentar sobre la sociología como una ciencia social que en momentos está cerca de la filosofía y la ideología. Por tanto, la sociología debe reflejarse como una ideología ilustrada y al servicio del pueblo. Mario Bunge también comenta sobre la filosofía y la tecnología, advirtiendo que es poco usada por los tecnólogos y viceversa por los filósofos; sin embargo, la tecnología plantea un cúmulo de problemas filosóficos, desde la búsqueda de supuestos hasta el conocimiento tecnológico (Bunge, 1980). Como contraste a estas ideas Peter Checkland a la vez resalta el papel del tecnólogo (el ingeniero) que aplica, contrasta, valida y por tanto ayuda a construir conocimiento científico, haciendo que la tecnología y la ciencia coexistan en un proceso donde se retroalimentan (Checkland, 1994).

En cuanto a los problemas sociales que surgen en países subdesarrollados como el caso de Perú donde existe hambre, desocupación, el reciente problema de inmigrantes, corrupción, etc.; entonces es importante "La actitud constructiva es poner el hombro, sea convirtiéndose él mismo en científico social ocasional, sea promoviendo la transferencia de metodologías de las ciencias maduras a las inmaduras, en este caso las sociales. Cualquiera que sea el modo de colaboración que elija el científico proveniente de una ciencia madura es probable que proponga un saneamiento del vocabulario sociológico, vocabulario en gran medida impreciso que no se presta al pensamiento riguroso ni a la comunicación clara" (Bunge, 1980). Con la presente tesis se presenta un aporte para atacar el problema de la producción agrícola, el mismo

que tiene mucho componente social y que se busca mejorar las condiciones de vida del poblador andino a través de modelos formales.

En cuanto a los fundamentos del pensamiento de sistemas se encuentran la cibernética propuesta por Rosenblueth, Wiener y Bigelow, quienes difundieron que el comportamiento dirigido a metas puede ser explicado por la retroalimentación negativa. Lo que estableció que nuestro comportamiento podía explicarse mediante por métodos estrictamente científicos. Posteriormente Wiener difunde la Cibernética, teoría que explicaba el funcionamiento de máquinas mediante el uso de bucles de retroalimentación negativa (Wiener, 1985).

En el artículo los autores comentan que el comportamiento humano no sólo se rige por auto gobierno; sino, más bien como sistemas biológicos que requieren de metabolismo y el constante aprendizaje somos individuos auto productivos; además hacen importantes apreciaciones sobre teóricos que realizan importantes avances en estas áreas como el biólogo chileno Huberto Maturana y Francisco Varela que establecen que los seres vivos deben ser conceptualizados como autopoieticos (Maturana & Varela, 1973).

Sobre la retroalimentación negativa y la retroalimentación doble, comentan que la primera es para corregir errores y crear máquinas autorregulables como por ejemplo el caso del termostato, el cual debe encender o apagar el calefactor de acuerdo a la temperatura ambiente y según la diferencia con la temperatura deseada (el objetivo o meta).

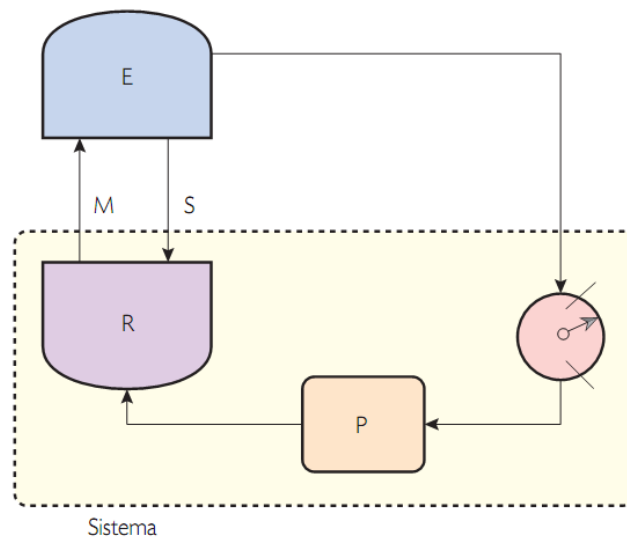
Otro estudio importante relacionado es el de Ross Ashby, psiquiatra que estudio el comportamiento de los animales ante situaciones inesperadas, en las que el organismo podía ajustarse hasta encontrar un nuevo comportamiento eficiente, no sólo la estabilidad, lo que Ashby llamó “ultra sensibilidad” (Ashby, 1960). Los componentes y estructura de sistema “ultrasensible” se pueden ver en la figura 7.

En el sistema, la parte responsable de regular la interacción sensorio motora es representada por (R), mientras que el ambiente externo es representado por (E). Las dos partes están acopladas mediante movimientos (M) desempeñados por el sistema, y las sensaciones (S) recibidas por su entorno. Esto puede ser la base de un “bucle” de retroalimentación negativa. La forma precisa de comportamiento está determinada por parámetros (P), indicados por una flecha que va de (P) a (R) (Ashby, 1960).

La nueva ciencia cognitiva toma con seriedad el hecho de que participamos directamente en las vidas de otros, por ejemplo, por medio de la coregulación de nuestras interacciones sociales. Paso a paso, la nueva ciencia cognitiva está poniéndose de acuerdo con toda la complejidad de la existencia humana (Froese, 2016).

**Figura 7**

*Elementos de un sistema “ultrasensible”*



## III.MÉTODO

### 3.1. Tipo de investigación

La presente investigación abordará temas concernientes a investigación básica en cuanto a que se propondrá modelos matemáticos para producción agrícola y su optimización, esto debido a las limitaciones de modelos similares para trabajar bajo condiciones reales para su simulación y optimización; además, de las peculiaridades de los proyectos implementados en la región del Cusco y los Andes peruanos en general. La investigación también es aplicada pues tienen propósitos prácticos bien definidos; es decir, se plantea la presente investigación para transformar un determinado sector de la realidad como es el campo de la optimización matemática para sistemas de producción.

### 3.2.Población y muestra

#### 3.2.1. Población

Para determinar la población se considera la información histórica de impactos en la gestión de sistemas de producción de los proyectos de mejoramiento de riego de Plan Meriss Inka obtenidos de los informes finales de los proyectos ejecutados, para la investigación en particular para desarrollar el modelo de optimización de proyecto de mejoramiento de riego se considera la cantidad de proyectos implementados en la provincia de Anta en la región del Cusco; por tanto:

$$N = 05 \text{ proyectos}$$

#### 3.2.2. Muestra

El muestreo es el proceso de seleccionar sistemáticamente elementos representativos de una población. Cuando estos elementos seleccionados son examinados de cerca se supone que el análisis revelará información útil acerca de la población como un todo.

Para la investigación la cantidad de proyectos son fáciles de procesar y analizar estadísticamente con ayuda del computador por lo que se trabajará en la investigación con la información recolectada de los 05 proyectos considerados en la población, por lo tanto:

$$n = 05 \text{ proyectos}$$

Siendo la fórmula para determinar la muestra:

$$n = \frac{4NPQ}{E^2(N-1) + 4PQ}$$

Donde:

N es el tamaño de la población.

P es la probabilidad de éxito.

Q es la probabilidad de fracaso.

E es el error permitido.

### 3.3. Operacionalización de variables

**Tabla 4**

*Operacionalización de variables*

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS
<b>INDEPENDIENTE</b>			
<b>MODELO DE OPTIMIZACIÓN</b>	Formulación de los modelos matemáticos de optimización.	- Modelo de simulación. - Funciones de decisión.	- Número variables endógenas. - Número variables exógenas. - Restricciones. - Punto de equilibrio. - Medidas de dispersión - Medidas de tendencia central.
	Formulación de los modelos de optimización utilizando algoritmos genéticos.	- Método de LaGrange. - Operadores de Selección	- Máximos. - Mínimos. - Condiciones de Kuhn Tucker - Selección por torneo - Selección sexual - Complejidad.
<b>DEPENDIENTE</b>			
<b>ADMINISTRACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DE LOS PROYECOS DE MEJORAMIENTO DE RIEGO</b>	Capacitación	Capacitaciones brindadas a los regantes.	Tiempo en que finalizan las capacitaciones.
	Organización	Fortalecimiento de la organización de regantes.	Tiempo en que se logra el fortalecimiento de la organización al 100%
		Administración del agua	Tiempo en que se logra la administración del agua en 100%
		Eficiencia de la aplicación de Técnicas de Riego.	Tiempo en que se logra la aplicación de técnicas de riego al 100%
		Eficiencia de la aplicación de técnicas de cultivo.	Tiempo en que se logra la aplicación de técnicas de cultivo al 100%
	Obras	Obras planificadas.	Tiempo en que se logra culminar las obras al 100%
	Agua para riego	Oferta hídrica captada con proyecto.	Tiempo en que se logra el objetivo de oferta hídrica con proyecto.
	Suelo agrícola	Total de suelo agrícola a lograr con el proyecto.	Tiempo en que se logra el objetivo de suelo agrícola con proyecto.
	Producción	Producción total.	Porcentaje de incremento de suelo agrícola.
	Intensidad de uso de suelo	Campañas agrícolas por año.	Porcentaje de incremento de la producción con proyecto.
Rentabilidad	- Utilidad.	-Nuevos Soles / campaña.	
	-Análisis de punto de equilibrio.	-Volumen de producción (Oferta).	
	-Costos de producción.	-Suelo agrícola (Ha). -Precio de venta. -Demanda.	

### **3.4. Instrumentos de investigación**

#### **3.4.1. Trabajo de campo**

El trabajo de campo debemos desarrollarlo en el medio geográfico, social de la investigación, para el caso se harán visitas a personas relacionadas con la investigación (proyectistas), a los mercados de abastos. Esto para obtener mayor información sobre los requerimientos del modelo de optimización, la función objetivo y sus restricciones.

#### **3.4.2. Gabinete**

Consiste en el procesamiento de información (discriminación y redacción del informe final de nuestro trabajo de investigación).

#### **3.4.3. Materiales y equipos**

- Documentación de optimización matemática.
- Documentación de investigación de operaciones.
- Documentación de algoritmos genéticos.
- Manuales de software de simulación.
- Reportes de simulaciones.
- Computador personal.

#### **3.4.4. Instrumentos de medición**

- Observación directa.
- Análisis de contenidos (Estudio definitivo del Proyecto de Irrigación Pampaconga).

#### **A. Tabla de tabulación de datos de datos reales y simulados por mes**

Los resultados de simulación por cada mes se tabulan para verificar su precisión.

**Tabla 5**

*Tabla datos reales y resultados de simulación de caudales en m<sup>3</sup> por mes*

<b>Ítem</b>	<b>Datos reales</b>	<b>Resultados de simulación</b>
<b>1</b>		
<b>2</b>		
<b>3</b>		
<b>4</b>		
<b>5</b>		
<b>SUMA</b>		
<b>Media</b>		
<b>Desv Est</b>		
<b>Varianza</b>		
<b>MAX</b>		
<b>MIN</b>		

#### **B. Tabla de tabulación de datos subsistemas**

Para verificar la validez de la información y por ende de los modelos matemáticos propuesto para comprender el modelo de producción agrícola bajo condiciones de riego, se propone se requiere tabular información real de los proyectos de riego en la provincia de Anta ejecutados por Plan Meriss Inka, esto para verificar las dimensiones de: capacitación, organización, obras, agua para riego, suelo agrícola, producción e intensidad de uso de suelo.

**Tabla 6**

*Información histórica subsistema capacitaciones*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que finalizan las capacitaciones (meses)</b>
<b>1</b>	
<b>2</b>	
<b>3</b>	

4

5

---

**Promedio**


---

**Desviación  
Estándar**


---

**Tabla 7***Información histórica subsistema organización*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra el fortalecimiento de la organización al 100%</b>	<b>Tiempo en que se logra la administración del agua en 100%</b>	<b>Tiempo en que se logra la aplicación de técnicas de riego al 100%</b>	<b>Tiempo en que se logra el objetivo al 100%</b>
1				
2				
3				
4				
5				
<b>Promedio</b>				
<b>Desviación Estándar</b>				

**Tabla 8***Información histórica subsistema obras*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra el culminar las obras 100%</b>
1	
2	
3	
4	
5	
<b>Promedio</b>	
<b>Desviación Estándar</b>	

**Tabla 9***Información histórica subsistema agua para riego*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra captar la el objetivo de oferta hídrica del con proyecto.</b>
1	
2	
3	
4	
5	
<b>Promedio</b>	
<b>Desviación Estándar</b>	

**Tabla 10***Información histórica subsistema suelo agrícola*

<b>Proyecto</b>	<b>Objetivo total Suelo agrícola con proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra el objetivo al 100%</b>	<b>Tierra de cultivo inicial</b>	<b>Porcentaje de incremento de suelo agrícola</b>
1				
2				
3				
<b>Promedio</b>				
<b>Desviación Estándar</b>				

**Tabla 11***Información histórica subsistema producción*

<b>Proyecto</b>	<b>Producción sin proyecto (Kg)</b>	<b>Producción máxima con proyecto (Kg)</b>	<b>Porcentaje de incremento de producción con proyecto</b>
1			
2			
3			

4

5

---

**Promedio**


---

**Desviación  
Estándar**


---

**Tabla 12***Información histórica subsistema intensidad uso de suelo*

<b>Proyecto</b>	<b>Intensidad de uso de suelo sin proyecto</b>	<b>Intensidad de uso de suelo con proyecto</b>	<b>Porcentaje de incremento del uso de suelo</b>
1			
2			
3			
4			
5			
<b>Promedio</b>			
<b>Desviación Estándar</b>			

### 3.5. Procedimientos

#### 3.5.1. Conceptualización del modelo de optimización del sistema de producción para los proyectos de mejoramiento de riego

Para abordar el tema de conceptualización del modelo de optimización de sistemas de producción en proyectos de mejoramiento de riego debemos involucrarnos en el tema del acceso y administración del agua que en nuestros días se ha convertido en un problema por los problemas climáticos presentes y que ha sido un tema de suma importancia desde la época de los Incas como Nieto Degregori manifiesta desde que los españoles llegaron al Cusco quedaron impresionados por la majestuosidad del Coricancha (Templo del Sol), los cronistas de la época cuenta que las paredes del templo estaban cubiertas de láminas de oro y plata y que los jardines

del templo tenían estatuas de animales a escala natural hechos del mismo material; sin embargo Nieto Degregori resalta que en el templo había otro tesoro poco valorado por los españoles que consistía en cinco fuentes de agua que servían para regar los jardines del templo (Nieto Degregori, 1995).

Las fuentes del templo alimentadas por canales subterráneos fueron descuidadas por los españoles y estas comenzaron a secarse de manera paradójica la posesión del agua paso al poder de los españoles o sus descendientes por tanto el poblador del Cusco y en general de los Andes peruanos que por miles de años forjaron una agricultura altamente desarrollada como lo demuestra los restos arqueológicos de Moray fue despojado de los elementos indispensables para garantizar su subsistencia como son la tierra y el agua.

El general Juan Velasco Alvarado como política para reivindicar los derechos del poblador andino lleva a cabo la “Reforma Agraria”, con la cual se procede a devolver la tierra a los campesinos que la trabajaban. “Es en este contexto que surge, hacia 1976 el Plan Meriss como un proyecto de mejoramiento de riego en el departamento de Cusco (ubicado en la sierra sur del Perú) que combinando los esfuerzos del Estado peruano y la cooperación técnica y financiera de la República Federal de Alemania quería reconstruir o remediar el lamentable abandono en que se encontraba la agricultura serrana” (Nieto Degregori, 1995), Lo que busca principalmente Plan Meriss Inka es que los agricultores de la zona de Cusco estuvieran en condiciones de mejorar su producción y por lo mismo de lograr una vida más digna proporcionándole al campesino nuevos sistemas de riego o mejorando los que ya tenían.

En el ámbito de intervención el PEPMI como diagnóstico identifica las siguientes situaciones problemáticas (GPER-Inka, 1995):

- Capacitaciones rústicas.
- Pérdidas por filtración.

- Inadecuadas estructuras de distribución.
- Organización poco sólida en la administración de recursos hídricos.
- Deficiente utilización de recursos hídricos a nivel de parcela.
- Las principales consecuencias de estas situaciones problemáticas son:
- Insuficiente disponibilidad y oportunidad hídrica.
- Conflictos continuos.
- Periodos de siembra extensos.
- Los cultivos son vulnerables a efectos de sequías y heladas.
- Limitado uso del suelo.

Para afrontar la situación problemática el PEPMI implementa proyectos de mejoramiento de riego, las fases que involucra el desarrollo de un proyecto de mejoramiento de riego son:

- Elaboración de Estudios.
- Construcción de Obras.
- Sistemas de Riego en Gestión por Usuarios

La adecuada ejecución de estas fases debe reflejarse en el “Incremento de la producción y productividad a través del uso racional de los recursos agua y suelo” (Inka, 2001).

Como resultado de las innumerables experiencias llevadas a cabo por Plan Meriss se ha sistematizado la experiencia en el desarrollo de proyectos y como resultado de este proceso se ha obtenido la Guía de Estudios, proceso de sistematización en el que participó el autor de la presente tesis.

En la presente sección se identifican las principales variables a tomar en cuenta al desarrollar los proyectos socio-económicos y sobre las cuales se desarrollan los múltiples procesos de monitoreo, etc.

### **3.5.1.1. Elaboración de estudios**

Esta etapa del proyecto tiene como finalidad determinar la viabilidad económica, social y ambiental así como presentar los expedientes técnicos para la ejecución del proyecto (Hurtado Huaman, 2014). Dentro del marco lógico que siguen los proyectos se considera:

- Estudios de identificación y priorización de cuencas.
- Estudios de priorización de proyectos.
- Estudios de prefactibilidad y/o factibilidad con diseños definidos.
- Los puntos abordados en la “Guía de Estudios Definitiva” son:
  - Población del ámbito del proyecto.
  - Principales actividades económicas y fuentes de ingreso familiar.
  - Servicios básicos.
  - Características fisiográficas y climáticas.
  - Sistema(s) de riego.
  - Esquema hidráulico e infraestructura.
  - Gestión del (los) sistema(s) de riego.
  - Eficiencia total del (los) sistema(s) de riego.
  - Sistema (s) de producción agropecuaria.
  - Zonas agro-ecológicas de producción.
  - Tenencia y conducción de la tierra.

- Unidades familiares de producción (UFP).
- Utilidad total generada en el área de proyecto.
- Empleo en la agricultura y ganadería.
- Planteamiento hidráulico.
- Gestión del (los) sistema(s) de riego.
- Infraestructura de riego.
- Producción agrícola bajo riego por UFP.
- Producción pecuaria por UFP.
- Total de utilidades agropecuarias.
- Estrategia de ejecución.
- Gestión institucional.
- Construcción y protección de obras.
- Acompañamiento en la gestión del (los) sistema(s).
- Conservación de fuentes de agua en cuenca.
- Aspectos formales.
- Presupuesto.
- Estudio de mercado y tecnología.
- Tecnología.

### 3.5.1.2. Construcción de obras

Esta fase de los proyectos tiene como principal objetivo la construcción de infraestructura de riego como son represas, canales de riego, bocatomas, etc., infraestructura que tiene la finalidad de transportar el líquido elemento a los terrenos agrícolas del campesino evitando que el agua se filtre como ocurre en canales de riego de tierra que originalmente existen en los ámbitos de intervención.

Al respecto se pueden diferenciar dos fases en la primera etapa del vida del PEPMI: “uno que va de 1978 a 1980 y otro que inicia en 1981 y se prolonga hasta 1985” (Nieto Degregori, 1995).

El primer periodo se caracteriza por como una fase de orientación, planificación y preparación de estudios de factibilidad.

En el segundo periodo en cambio es de construcción de las primeras obras en donde la participación campesina y la sostenibilidad eran incipientes. De hecho el campesino no tenía ninguna participación en las obras diseñadas o ejecutadas.

En estas fases el PEPMI estaba más preocupado en lograr la rentabilidad de los proyectos más que en la sostenibilidad de los mismos, el PEPMI estaba convencido que llevar agua al campesino era más que suficiente para que este pueda vivir en abundancia. En razón a esto el PEPMI ejecutaba obras fríamente técnicas que no se ajustaban a las necesidades del campesino a esta etapa el personal del PEPMI la recuerda como la de “tecnicismo” y “obrismo”. Llegando incluso a menospreciarse las organizaciones de los regantes tal distanciamiento conllevó a que los campesinos no usen la infraestructura de riego construida por el PEPMI prefiriendo usar sus precaria infraestructura de riego debido a que no sentían que como propia las obras hechas por el PEPMI, para superar este problema actualmente se ha

incorporado la participación de los campesinos como contrapartida en el presupuesto de las obras (Nieto Degregori, 1995).

### **3.5.1.3. Sistemas de riego en gestión por usuarios.**

Esta fase de los proyectos tiene como finalidad lograr organizaciones autogestionarias que sean capaces de administrar por si solas sus recursos hídricos, así como el manejo eficiente del agua a nivel parcelario mediante la incorporación de tecnología en riego y manejo de cultivos que conduzcan a la mayor intensidad del uso de suelo y el cambio en la cédula de cultivo por productos de mayor rentabilidad teniendo como principal obstáculo para esto la tradición de cultivo, sus principales actividades son (GPER-Inka, 1995):

- Consolidación de organizaciones de riego.
- Riego parcelario y manejo de cultivos.
- Protección de la Infraestructura de riego, agua y suelos.

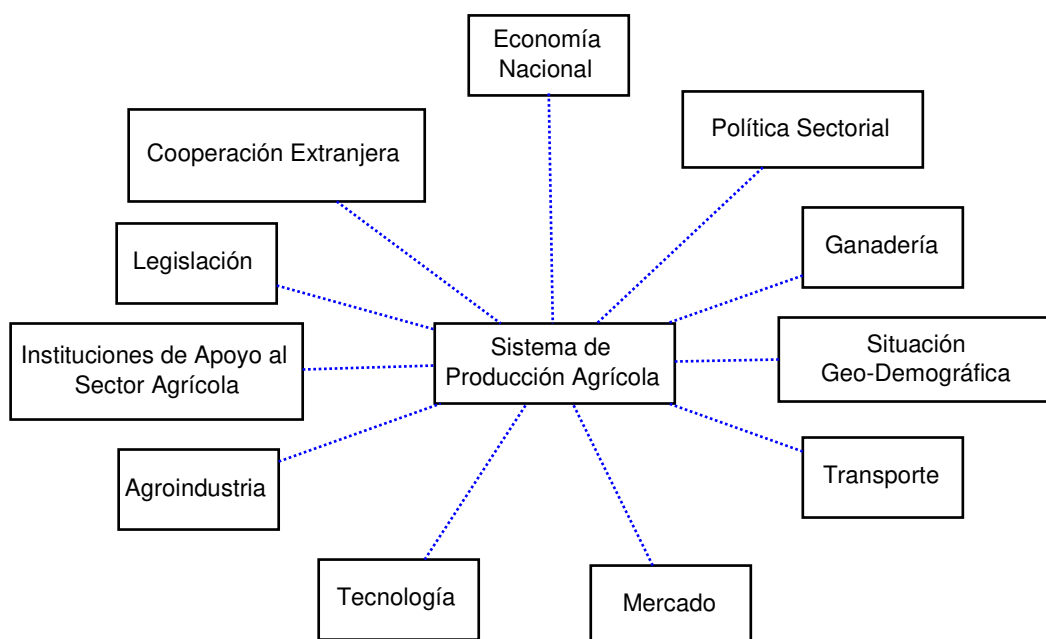
### **3.5.1.4 Análisis del entorno del sistema de producción de los proyectos de mejoramiento de riego**

Consecuentes con la metodología de pensamiento de sistemas abordamos el tema de investigación por los principales objetivos que surgen como resultado de la interacción de los sistemas y sus componentes en el proceso de ejecución de proyectos; así mismo, la retroalimentación surgida al momento de la interacción de los componentes estimula la vigencia del sistema o su pérdida de vigencia y/o su desaparición. La principal herramienta de la cual partimos es el extensionismo o síntesis, que es fundamento del “Pensamiento de Sistemas” doctrina que dicta entre otras principalmente considerar al sistema objeto de estudio como parte de un sistema mayor.

Según el análisis realizado podemos observar en la figura 8, el Diagrama contextual del entorno del sistema objeto de estudio.

**Figura 8**

*Diagrama contextual del entorno del sistema de producción agrícola de los proyectos ejecutados por Plan Meriss Inka*



Una vez identificados los principales sistemas de los que es parte el Sistema de Producción Agrícola de Plan Meriss Inka, es posible realizar un análisis reduccionista de los mismos. Entre las principales características de los sistemas del entorno podemos mencionar los siguientes:

- Cooperación extranjera

El PEPMI ejecuta proyectos de riego en el marco de la Cooperación Financiera con la República de Alemania por D.L. 565 Ley Orgánica y de Funcionamiento del Ministerio de Agricultura, El ámbito de intervención actual abarca las regiones de Cusco y Apurímac. Sin embargo, por la naturaleza productiva de los proyectos es factible que otros países y/o instituciones puedan financiar los proyectos.

- Economía nacional

La realidad de la Economía Nacional afecta la producción del campesino y sus futuras expectativas de producción, la producción agrícola o la intervención en los proyectos serían en vano si no se tiene una situación económica aceptable.

- Legislación

Es importante conocer la legislación vigente sobre temas que involucren a la agricultura esto con la finalidad de prever estrategias de intervención en los proyectos.

- Política sectorial

La política sectorial del gobierno para la agricultura determina mucho el presupuesto y los recursos que se puedan asignar para la correcta intervención en el campo.

- Ganadería

La ganadería ha sido considerada en el entorno de los sistemas agrícolas puesto que se va a medir de acuerdo a la cantidad de producción agrícola como insumo.

- Instituciones de Apoyo al Sector Agrícola.

Las instituciones cumplen el papel de guías para el correcto desarrollo agrícola, sin embargo, uno de los principales objetivos que deben alcanzar es la sostenibilidad de los proyectos y que el agricultor sea capaz de dirigir sus propios proyectos

- Situación Geo-Demográfica.

Representa a la población involucrada en el entorno del proyecto y las características del medio geográfico que posibiliten y/o faciliten la intervención del proyecto.

- Transporte

Es importante el acceso, con la finalidad de poder trasladar recursos institucionales y así mismo que la producción agrícola pueda ser trasladada de manera eficiente para su posterior comercialización, en caso de que no exista se evalúa la posibilidad de construir los respectivos medios de transporte.

- Agroindustria

La posibilidad de transformación de los productos agrícolas es importante de manera de crear valor agregado a los mismos y crear mejores condiciones de vida para el agricultor.

- Mercado

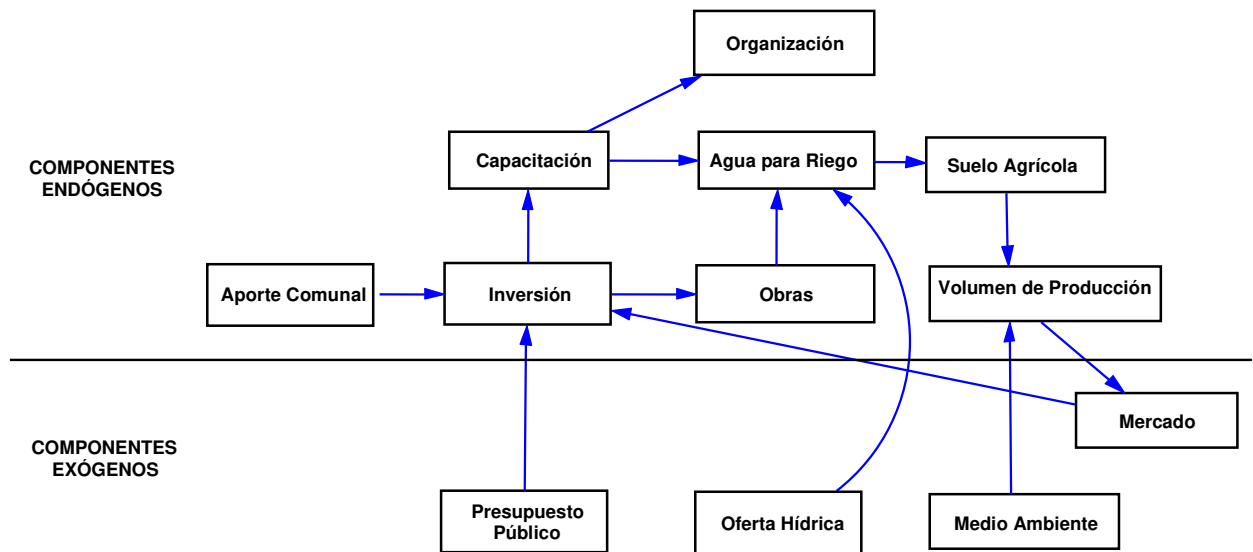
Si bien es importante garantizar la producción agrícola para el auto-consumo es importante generar mayores ingresos económicos para que la agricultura sea sostenible con el apoyo de la propia inversión del campesino.

- Sistema de tecnología para la producción.

Determina la aplicación del conocimiento al proceso productivo.

### **3.5.2. Modelamiento del sistema de producción agrícola en proyectos de mejoramiento de riego**

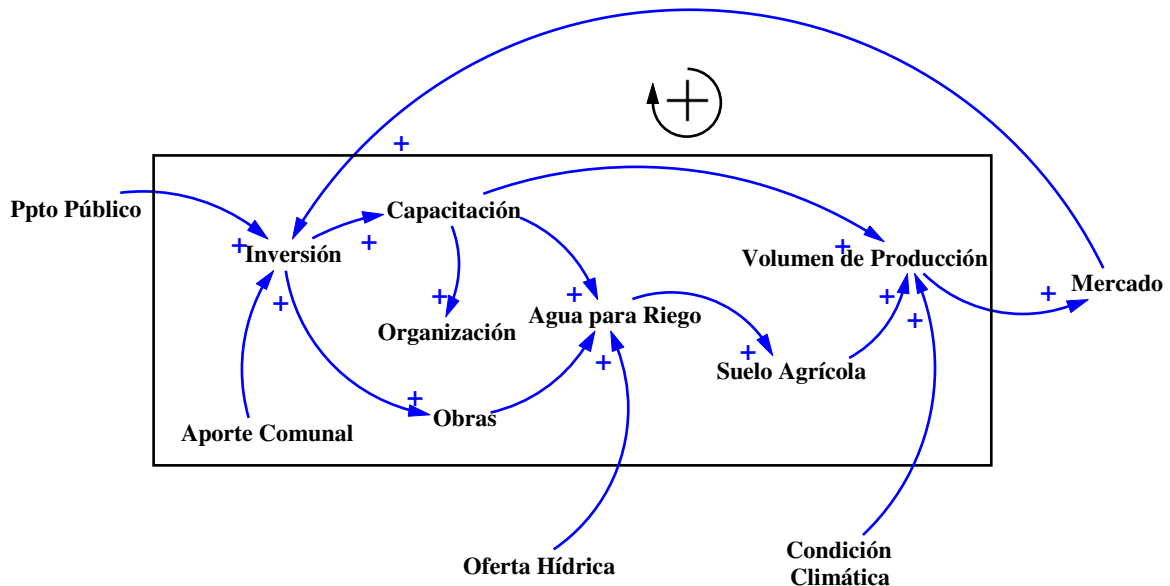
Para efectos de modelamiento del sistema de producción agrícola de los proyectos ejecutados por Plan Meriss Inka se han identificado principalmente componentes que sean cuantificables (incluso mediante funciones de probabilidad), los mismos que se muestran en un diagrama de bloques en figura 9.

**Figura 9***Sistema de producción agrícola*

En figura 10 se puede observar un diagrama contextual sobre las principales variables que intervienen en el Sistema de Producción Agrícola; así mismo, un concepto importante que cita la Dinámica de Sistemas es el de “retroalimentación” en este caso se identifica la retroalimentación de la variable “mercado” ubicada en el entorno del sistema hacia la variable interna “inversión”.

**Figura 10**

*Diagrama causa efecto del sistema de producción agrícola*



### 3.5.2.1. Modelamiento de subsistemas del sistema de producción agrícola en proyectos de mejoramiento de riego

Según la figura 10 debemos conceptualizar individualmente cada uno de los subsistemas para posteriormente formalizarlos.

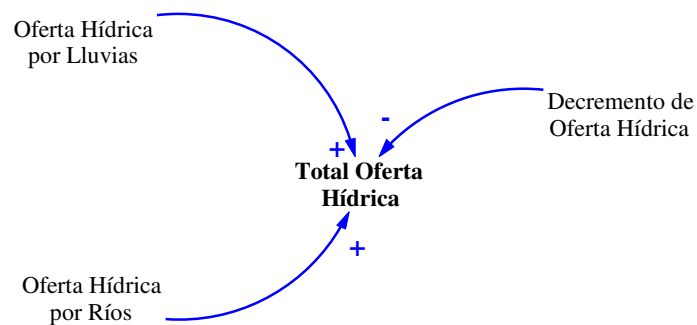
#### A. Subsistema oferta hídrica.

El agua es uno de los componentes más importantes para los proyectos de mejoramiento de riego, cuya cantidad es afectada actualmente por fenómenos climatológicos.

Objetivo del subsistema: determinar la cantidad de agua que se tiene disponible y su estacionalidad en el ámbito del proyecto; permite calcular el diseño de las obras para captar agua y en cuanto se puede ampliar la frontera agrícola.

**Figura 11**

*Diagrama causa efecto subsistema oferta hídrica*



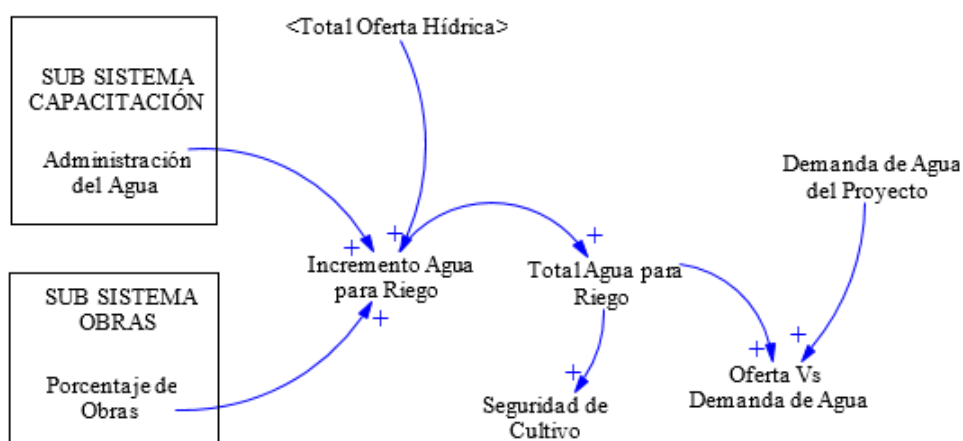
## B. Subsistema agua para riego

Una vez determinada la Oferta Hídrica del ámbito del proyecto este subsistema estudia la cantidad de agua que se puede captar directamente para uso agrícola en el proyecto, este subsistema también depende del resultado de otros subsistemas como son capacitación y obras.

Objetivo del subsistema: determinar el equilibrio entre la oferta y demanda de agua para fines agrícolas en el proyecto; así mismo, debe garantizar la seguridad de cultivo asegurando una cantidad constante estacionalmente de agua y reducir o eliminar la dependencia de factores exógenos como la presencia o ausencia de lluvias.

**Figura 12**

*Diagrama causa efecto subsistema agua para riego*



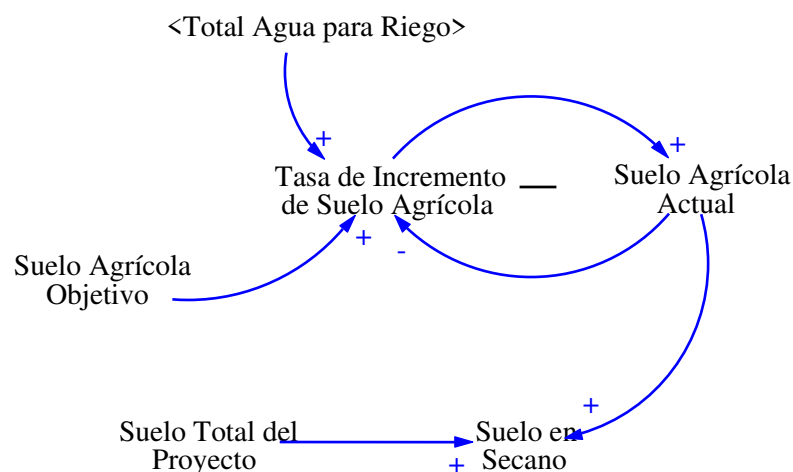
### C. Subsistema suelo agrícola

Este subsistema describe la cantidad en hectáreas del terreno disponible con fines agrícolas y su comportamiento en relación al tiempo y al porcentaje de avance del desarrollo del proyecto.

Objetivo del subsistema: determinar la ampliación de la frontera agrícola en razón a los resultados obtenidos del subsistema agua para riego.

**Figura 13**

*Diagrama causa efecto subsistema suelo agrícola*

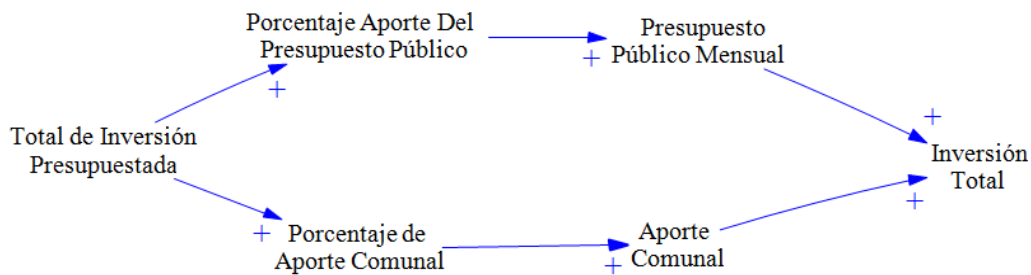


### D. Subsistema inversión

Este subsistema describe el presupuesto disponible para llevar a cabo las actividades como construcción de obras, capacitación en introducción de nuevas tecnologías y organización de regantes. Objetivo del subsistema: determinar la disponibilidad del presupuesto requerido para la ejecución del proyecto, el presupuesto consta de: presupuesto público y aporte comunal mensual.

**Figura 14**

*Diagrama causa efecto subsistema inversión*



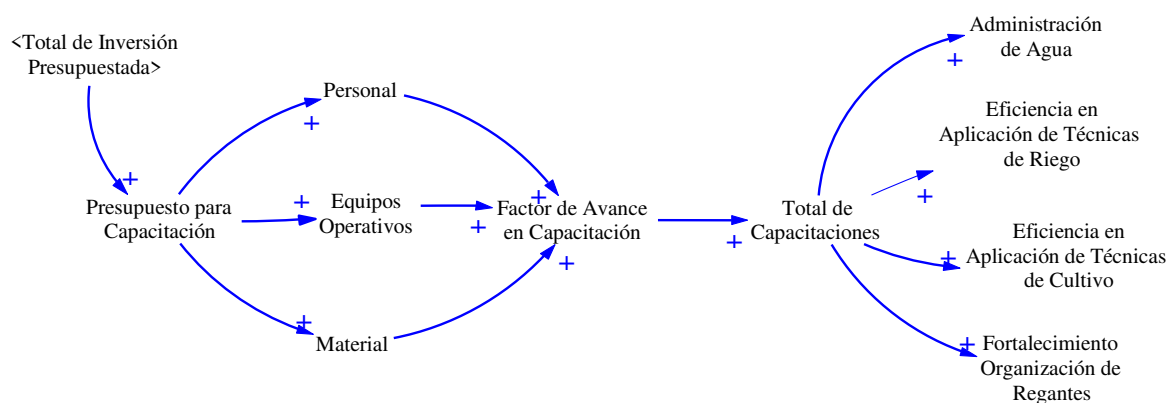
### E. Subsistema capacitación

Este subsistema describe las actividades a realizar en cuanto se refiere a capacitación, como construcción de obras, capacitación en introducción de nuevas tecnologías y organización de regantes.

El objetivo del subsistema es: determinar la disponibilidad del presupuesto requerido para la ejecución del proyecto, el presupuesto consta de: presupuesto público y aporte comunal mensual.

**Figura 15**

*Diagrama causa efecto subsistema capacitación*



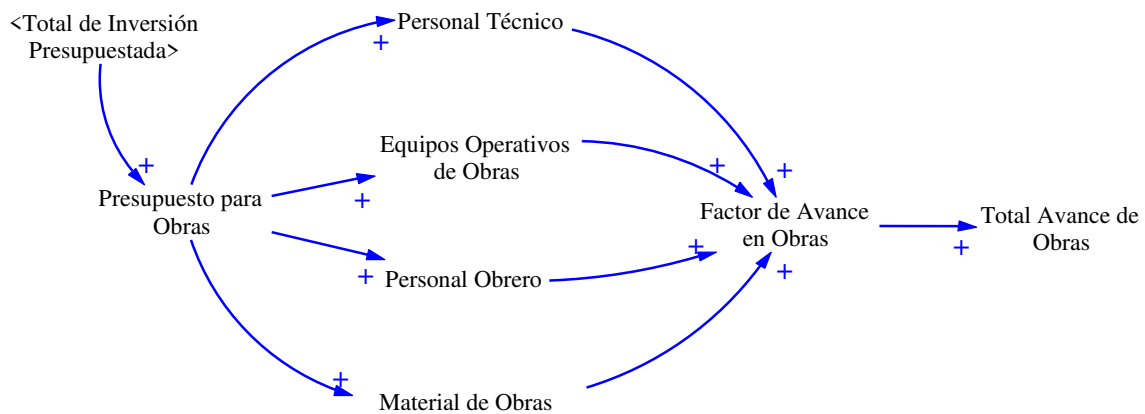
## F. Subsistema obras

Este subsistema describe las actividades a realizar en cuanto se refiere a construcción de obras (represas, canales de riego, bocatomas, etc.).

El objetivo del subsistema: determinar el avance de las obras en los proyectos de acuerdo a disponibilidad del presupuesto para recursos necesarios para la construcción de infraestructura de riego (personal técnico, equipos, obreros y material para obras).

**Figura 16**

*Diagrama causa efecto subsistema obras*



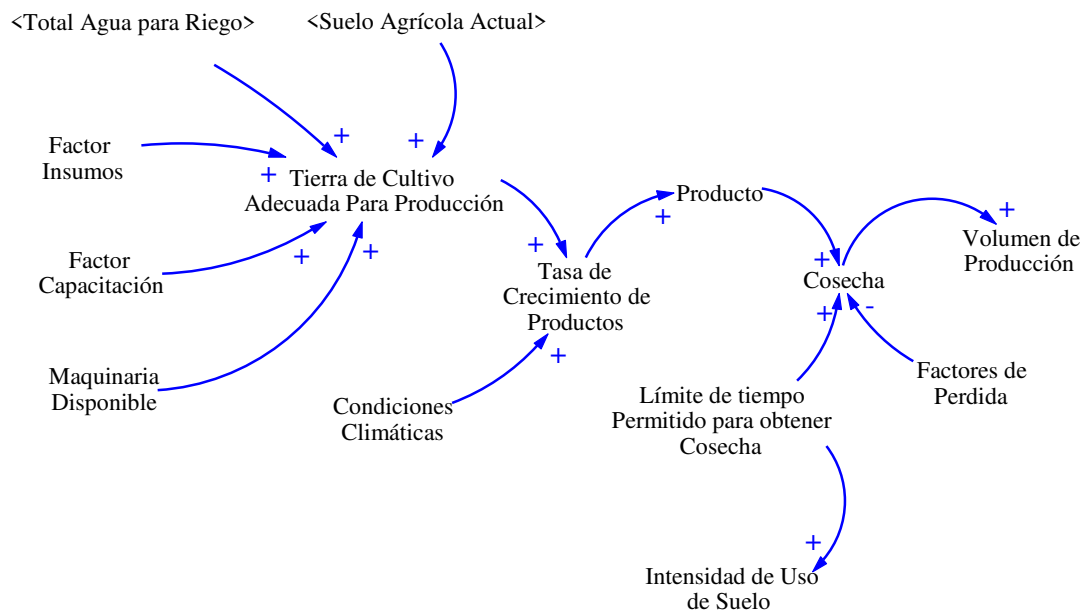
## G. Subsistema volumen producción

Este subsistema describe los resultados de las actividades productivas que se llevan a cabo en el proyecto.

El objetivo del subsistema es: determinar el volumen de producción del ámbito de ejecución del proyecto en relación a los avances en obras y capacitación.

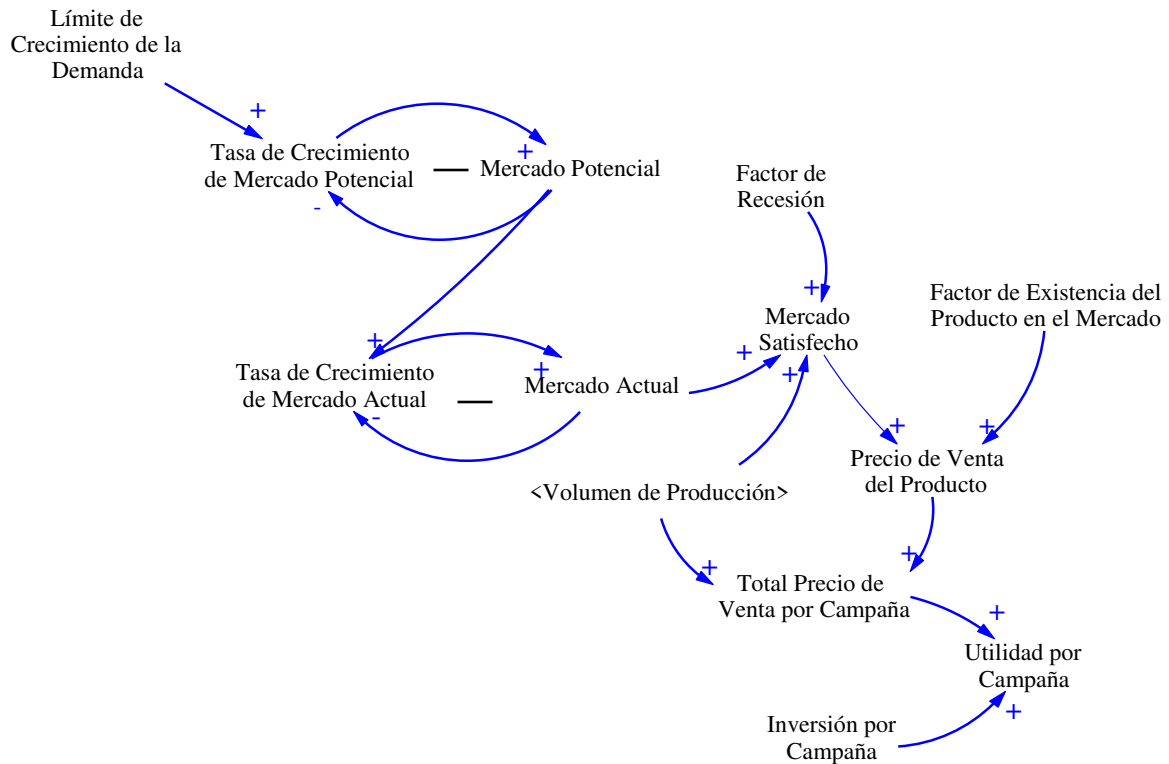
**Figura 17**

*Diagrama causa efecto subsistema volumen de producción*



## H. Subsistema mercado

La rentabilidad de todo proyecto se refleja en relación al performance que este tiene con el mercado lo que también se conoce la rentabilidad del proyecto, como ha ocurrido en los proyectos de la U.O. de Chumbivilcas Espinar los precios de venta llegaron a estar por debajo de los costos de producción. El objetivo del subsistema es: determinar el comportamiento de todo el sistema en relación al mercado.

**Figura 18***Diagrama causa efecto subsistema mercado*

### 3.5.3. Propuesta de formulación y aplicación del modelo

Según Javier Aracil la fase de formulación del modelo consiste en: “Una vez construido el diagrama causal del sistema bajo estudio se procede a la formulación del mismo con ayuda de un lenguaje formal preciso. En Dinámica de Sistemas consiste en primer lugar en el establecimiento del diagrama de Forrester, a partir del cual se escriben las ecuaciones del modelo” (Aracil, 1995); las ecuaciones pueden escribirse en un lenguaje Dynamo o cualquiera que permita hacer las simulaciones en computador para la presente investigación se ha utilizado la herramienta VENSIM que trabaja en función a diagramas de Forrester. En esta fase se determinan parámetros que intervienen en el modelo y se les asignan valores, cada modelo para ser simulado requiere de ecuaciones lógico-matemáticas, las mismas que han sido formuladas y son expuestas en la presente sección.

### **3.5.3.1. Implementación del modelo de simulación para el sistema de producción**

Antes de pasar a explicar cada escenario de la implementación del sistema vamos a mencionar algunas consideraciones de diseño, cuyo objetivo es hacer más comprensible el modelo; esto debido a que el desarrollo de un sistema socio-económico conlleva cientos de variables como en el presente proyecto (285 variables aprox.).

- Dividir el modelo en vistas que contengan variables más afines.
- Implementar vistas donde el proyectista pueda modificar el valor de las variables que se han considerado como parámetros para el modelo de simulación.
- La ventaja de dividir el modelo en vistas permite que el proyectista pueda adecuar el valor de las variables según el proyecto que desee implementar (de acuerdo al estudio de campo que se realice).
- Se han incluido en las vistas gráficos personalizados que permiten monitorear el comportamiento de las variables del sistema.
- El tiempo de simulación es de 6 años (puede ser ampliado o reducido).
- El nombre de las variables debe ser lo suficientemente largo; de manera que incluyan una descripción propia.

### **3.5.3.2 Formulación de los subsistemas**

#### **A. Subsistema oferta hídrica**

Este subsistema tiene por objetivo determinar la cantidad de agua (oferta hídrica) que se tendrá disponible para el proyecto esto mediante el tratamiento estadístico respectivo es importante acotar que las variables de este subsistema no pueden ser controladas y claramente en los gráficos respectivos se pueden ver las fluctuaciones del caso, se han considerado datos del proyecto Pampacongá y debido a que la versión del programa VENSIM no cuenta con funciones de probabilidad discreta el tratamiento se ha desarrollado en Excel como se explica en el anexo B y posteriormente los datos se han ingresado en una variable lookup en VENSIM,

los parámetros utilizados en esta vista se enumeran en la tabla 16. El resto de variables mencionadas en el subsistema son el resultado de la interacción de las mismas.

La oferta hídrica está compuesta por la cantidad de lluvias que puedan presentarse en la zona del proyecto cuyo modelamiento se muestra en la figura 19 y su comportamiento según la ecuación 3.1.

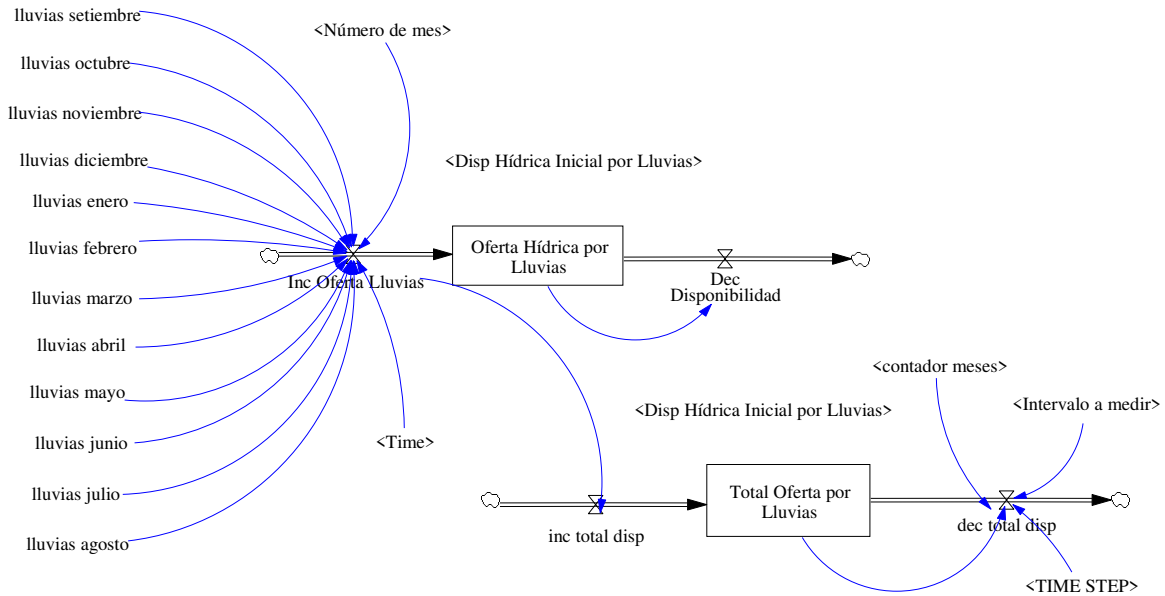
**Tabla 13**

*Parámetros vista "disponibilidad hídrica"*

<b>Variables</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Descripción</b>
Min DHPM	860.50	m3 / mes	Mínimo disponibilidad hídrica por mes
Max DHPM	6677,00	m3 / mes	Máximo disponibilidad hídrica por mes
Promedio DHPM	2851,00	m3 / mes	Promedio disponibilidad hídrica por mes
Desv Est DHPM	2411,00	m3 / mes	Desviación Estándar disponibilidad hídrica por mes
% Contribución lluvias a ríos	0,10	Porcentaje	Porcentaje de agua
Intervalo a Medir	3,00	mes	Número de meses en los que se van a acumular los datos de la simulación.
Disp Hídrica Inicial por Lluvias	0,00	m3	Disponibilidad hídrica inicial por lluvias.

**Figura 19**

*Diagrama de Forrester de oferta hídrica por lluvias*



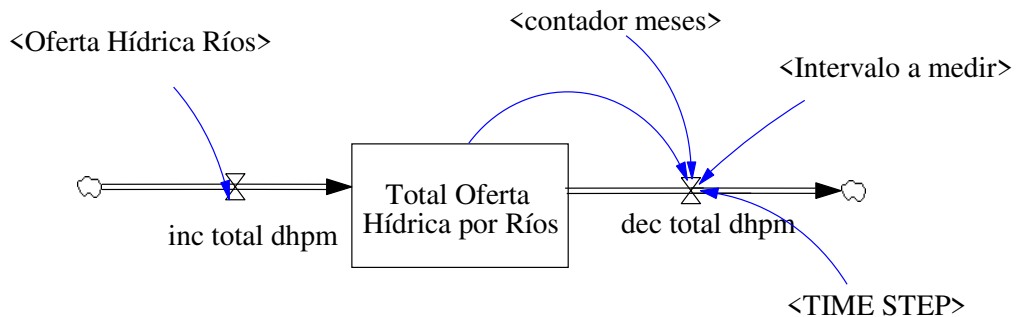
$$Total\ Oferta\ por\ Lluvias = \int lluvias(\text{numero de mes})dt$$

Ecuación N° 3.1

Así mismo el caudal de los ríos existentes en el ámbito del proyecto determina si existe suficiente agua para que el proyecto sea más productivo y de esa forma aprovechar mejor la tierra agrícola incrementando las campañas agrícolas.

**Figura 20**

*Diagrama de Forrester oferta hídrica por ríos*

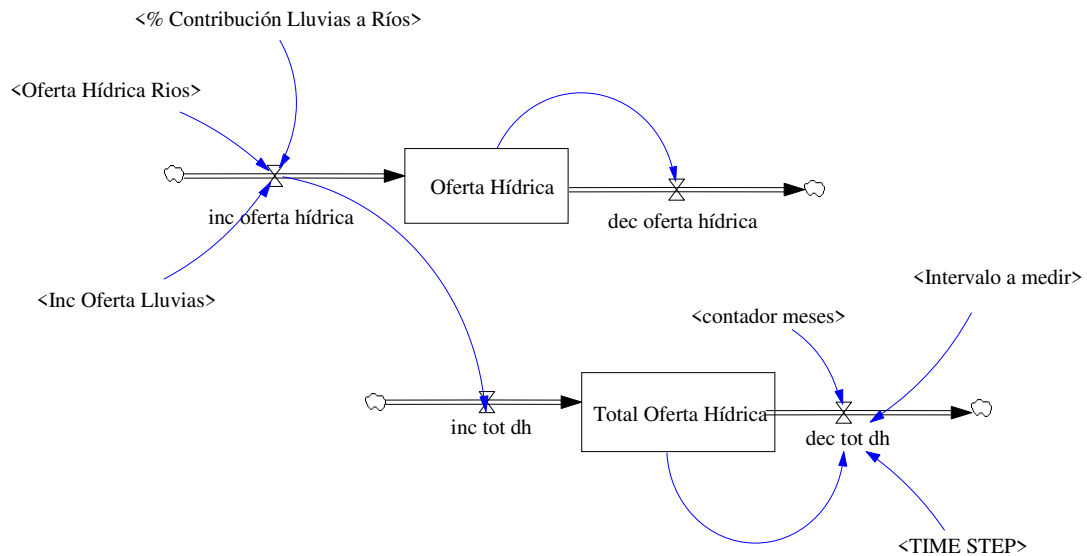


La figura 21 muestra el total de la oferta hídrica, fíjese que todavía no es toda la cantidad de agua que tenemos disponible para riego pues mucha de esta agua se pierde por filtraciones

u otros factores que explicaremos más adelante; el comportamiento del modelo se rige en base a la ecuación 3.2.

**Figura 21**

*Diagrama de Forrester total oferta hídrica*



$$Oferta\ Hídrica = \int ((OHR(t) + PCLLR(t) * ICLL(t)) - DOH(t))dt$$

Ecuación N° 3.2

Donde:

OHR : Oferta Hídrica de Ríos.

PCLLR: Porcentaje de Contribución Lluvias a Ríos.

ICLL : Incremente Oferta de Lluvias.

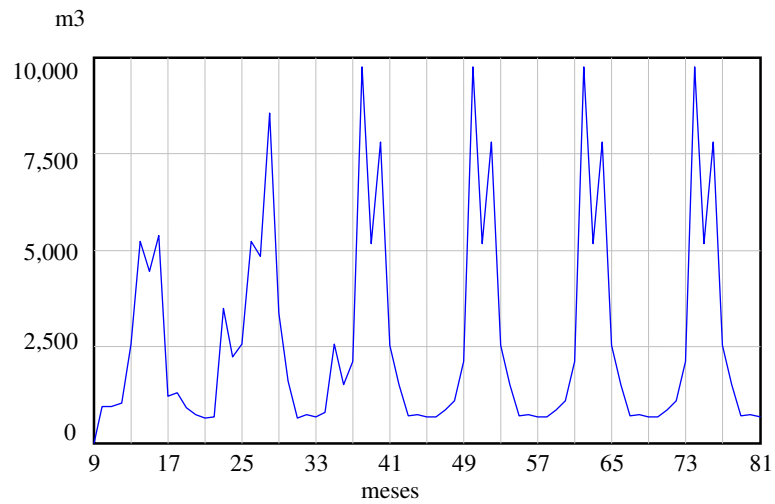
DOH : Decremento Oferta Hídrica.

El figura 22 muestra los resultados de la simulación para 06 años como se puede notar el mes de inicio es 9 pues el año hidrológico inicia en setiembre, además que es importante resaltar que esta variable externa al sistema es totalmente oscilatoria lo cual podemos verificar por observación directa nunca se tiene una cantidad de lluvias o caudales de ríos constantes lo cual indica el problema conocido de las sequías en los picos bajos de la figura 22 o las

inundaciones en casos de que se presente el “fenómeno del niño”, lo cual también es perjudicial para el proceso productivo, para esto se ha comprobado que los datos de simulación muestren un comportamiento adecuado en relación a los datos históricos.

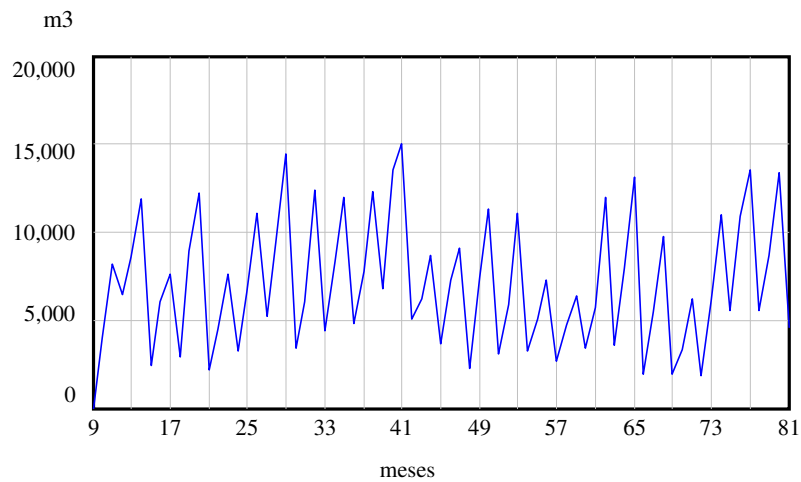
**Figura 22**

*Oferta hídrica por lluvias*



**Figura 23**

*Total, oferta hídrica*



## **B. El subsistema agua para riego**

Este subsistema involucra las variables que permiten obtener una cantidad de agua utilizable para riego entendiendo que tienen un factor imprescindible las variables de administración del agua y avance de obras pues en muchos proyectos se ha logrado una buena distribución del agua con la adecuada capacitación de los regantes y en este aspecto es importante notar que esta variable es retroalimentación del subsistema de capacitación mostrado más adelante.

Así mismo, la cantidad de agua que es captada en la cabecera del canal o la infraestructura de riego respectiva tiene que ser transportada hasta la zona geográfica del proyecto lo cual implica incluso varios kilómetros en los que el agua tiene que viajar por ende la variable porcentaje de avance de obra representa la calidad de revestimiento de los canales pues en canales de tierra el porcentaje de pérdida por filtración es alto, incluso por falta de presupuesto en algunos proyectos sólo se llega a revestir sólo algunos tramos lo que posteriormente implica mayores gastos en mantenimiento del canal incluso a lo largo de varios años de terminado el proyecto.

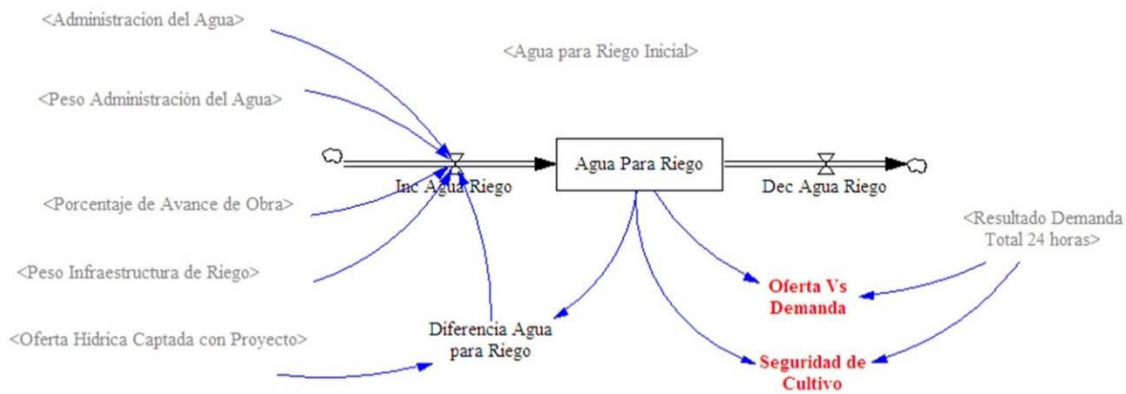
Un impacto importante de este subsistema una vez implementado el proyecto consiste en asegurar la disponibilidad del recurso hídrico para las campañas agrícolas y de esa forma mantener la seguridad de cultivo pues el agua aunque fuera escasa pero bien administrada y con la infraestructura adecuada puede ser suficiente según la demanda hídrica del proyecto; lo cual no sucede en condiciones donde la campaña agrícola se lleva sólo esperando lluvias (en secano), lo expuesto se muestra en las figuras 24 y 25; los parámetros utilizados en el subsistema se enumeran en la tabla 17 y la ecuación que rige su comportamiento en la ecuación N° 3.3.

**Tabla 14***Parámetros vista agua para riego*

<b>Variables</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Descripción</b>
Agua para riego inicial	9072,00	m3	En algunos proyectos existen una infraestructura de riego que permite la disponibilidad de agua, aunque por lo general el proceso productivo se realiza sólo en épocas de lluvia (secano)
Peso Administración del Agua	0,10	Porcentaje	El porcentaje de participación de la correcta administración del agua
Peso Infraestructura de Riego	0,25	Porcentaje	El porcentaje de participación del avance de la infraestructura de riego, cuyo impacto es alto.
Oferta Hídrica captada con proyecto	17172,00	m3 / mes	Es el cálculo del total de oferta hídrica que se espera captar una vez terminado el proyecto.
Infraestructura de Riego	0,05	Porcentaje	Que tan adecuada es la infraestructura de riego antes de iniciar el proyecto.

**Figura 24**

*Diagrama de Forrester de agua para riego*



$$\text{Agua para Riego} = \int (((\text{DAR} * \text{PAA}) * \text{AA}) * (\text{DAR} * \text{PIR}) * \text{PAO}) - \text{DCAR}) dt$$

Ecuación N° 3.3

Donde:

DAR : Diferencia Agua para Riego.

PAA : Peso Administración del Agua.

AA : Administración del Agua.

DAR : Diferencia Agua para Riego.

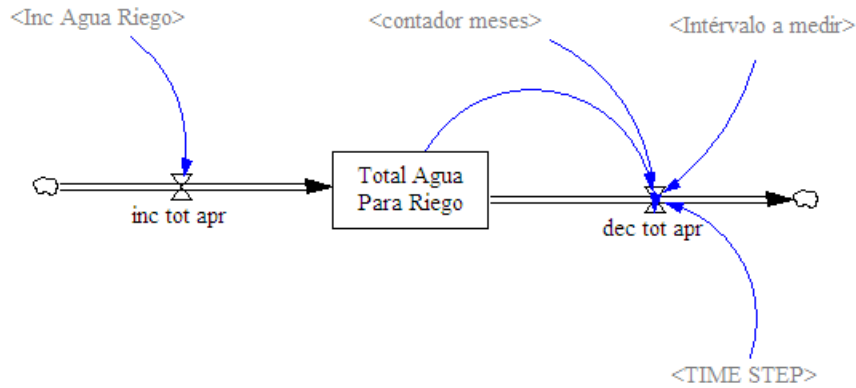
PIR : Peso Infraestructura de Riego.

PAO : Porcentaje de Avance de Obra.

DCAR: Decremento de Agua para Riego.

**Figura 25**

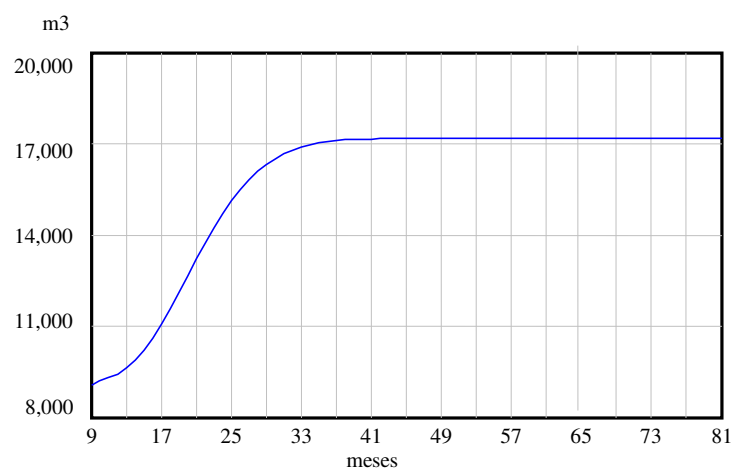
*Diagrama de Forrester total agua para riego*



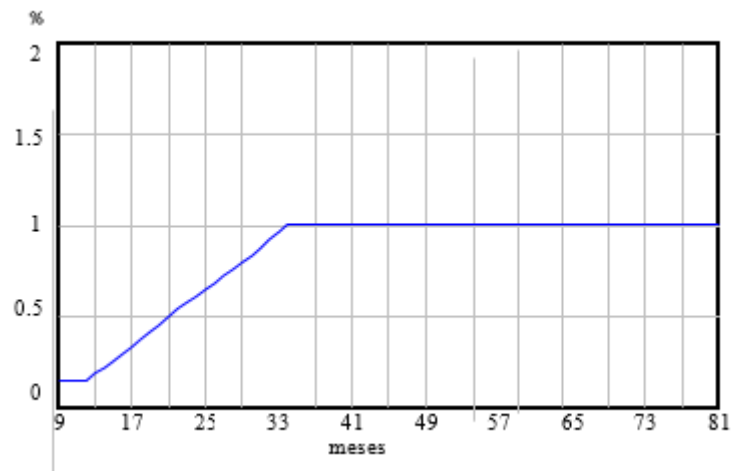
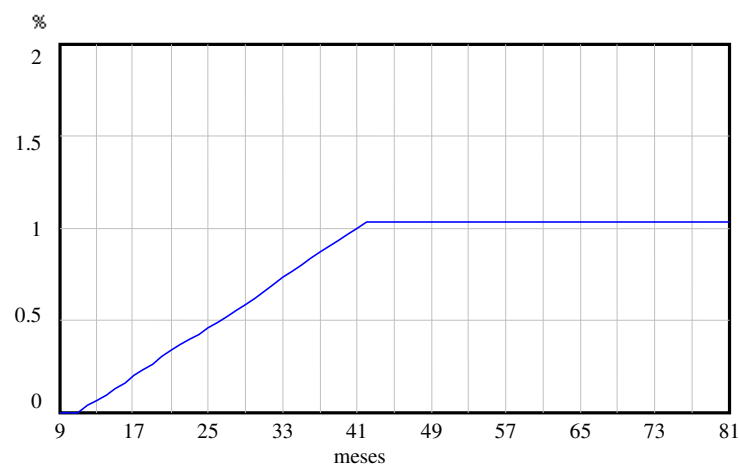
La figura 26 muestra los resultados de simulación del sistema y la cantidad de agua que se tendrá disponible para riego y como se puede observar se logra mayor agua para riego; este incremento es debido principalmente a que las variables capacitación y porcentaje de obras comienzan a ser más significativas lo cual se muestra en las figuras 27 y 28; posteriormente se puede observar que este es factor importante incluso para obtener más campañas agrícolas por año.

**Figura 26**

*Agua para riego*



En la escala utilizada "1" indica 100% en las figuras 27 y 28, es importante recordar que estas variables son resultado retroalimentación de la interacción con otros subsistemas.

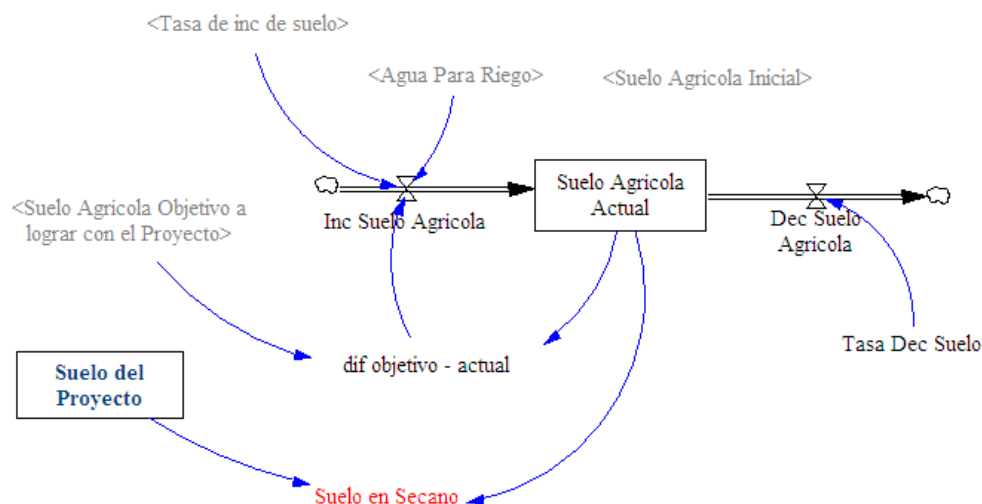
**Figura 27***Administración del Agua***Figura 28***Porcentaje de avance de obra***C. Subsistema suelo agrícola.**

Una vez que la cantidad de agua para riego se ha incrementado es posible incrementar la frontera agrícola es decir podemos regar mayor cantidad de terrenos que hasta ese entonces se consideran “suelo en seco”, los parámetros utilizados se enumeran en la tabla 18.

**Tabla 15***Parámetros vista principal tierra de cultivo*

<b>Variables</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Descripción</b>
Suelo Agrícola Inicial	232	Hectáreas	Cantidad de suelo agrícola antes de iniciar el proyecto.
Suelo Agrícola Objetivo a lograr con el Proyecto	423	Hectáreas	Es el cálculo del total de suelo agrícola que se espera lograr una vez terminado el proyecto.
Tasa de inc de suelo	0.06	Porcentaje	Es la tasa de incremento de suelo agrícola por mes cada según el agua para riego

El modelamiento de este subsistema se muestra en el Diagrama de Forrester N° 4.6 en el cual se observa claramente que el incremento es según la variable “Agua para Riego” del sub-sistema detallado en la sección anterior, el comportamiento se rige por la ecuación N° 4.4.

**Figura 29***Diagrama de Forrester suelo agrícola*

$$\text{Suelo Agrícola Actual} = \int \left( \left( \frac{AR(t)}{DOA} \right) * TIS \right) dt$$

## Ecuación N° 3.4

Donde:

AR : Agua para Riego.

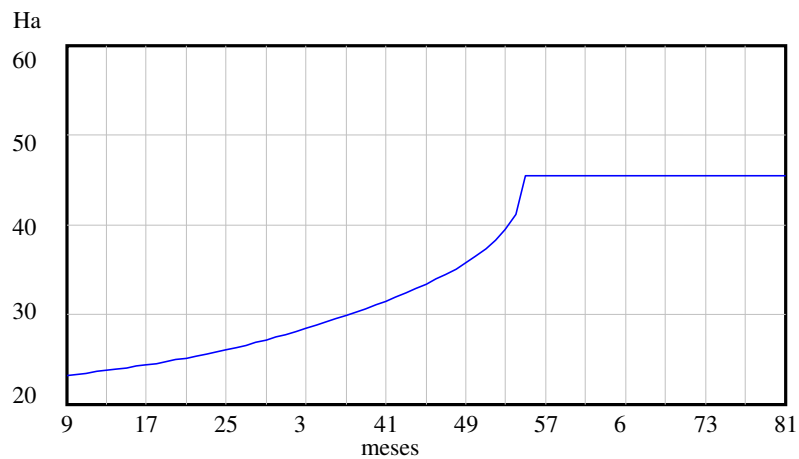
DOA : Diferencia Objetivo y Nivel Actual.

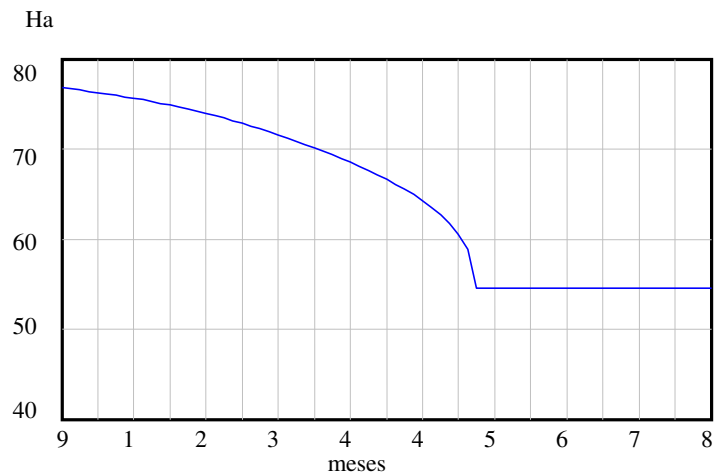
TIS : Tasa de Incremento de Suelo.

La figura 30 se observa que el objetivo se logra en el mes 55, VENSIM proporciona más herramientas para determinar exactamente los resultados numéricos si fuera el caso que el gráfico no sea lo suficientemente claro, de la misma forma en la figura 31 se muestra la reducción de los terrenos en seco (terrenos sin riego).

**Figura 30**

*Suelo agrícola actual*



**Figura 31***Suelo en seco***D. Subsistema inversión.**

Este subsistema muestra el comportamiento de las inversiones realizadas para lograr ejecutar el proyecto aquí podemos observar dos variables importantes como son: “ppto público mensual” (presupuesto público mensual) y aporte comunal, este último consiste en el dinero que se obliga a aportar a los usuarios para completar el proyecto. Como resultado de los desembolsos presupuestales al igual que la oferta hídrica estos son oscilatorios peor aún para este tipo de proyectos que son catalogados como de ayuda social muchas veces se les somete a recortes presupuestarios bruscos; por ende, el desembolso presupuestal mensual se ha representado como una función de probabilidad normal.

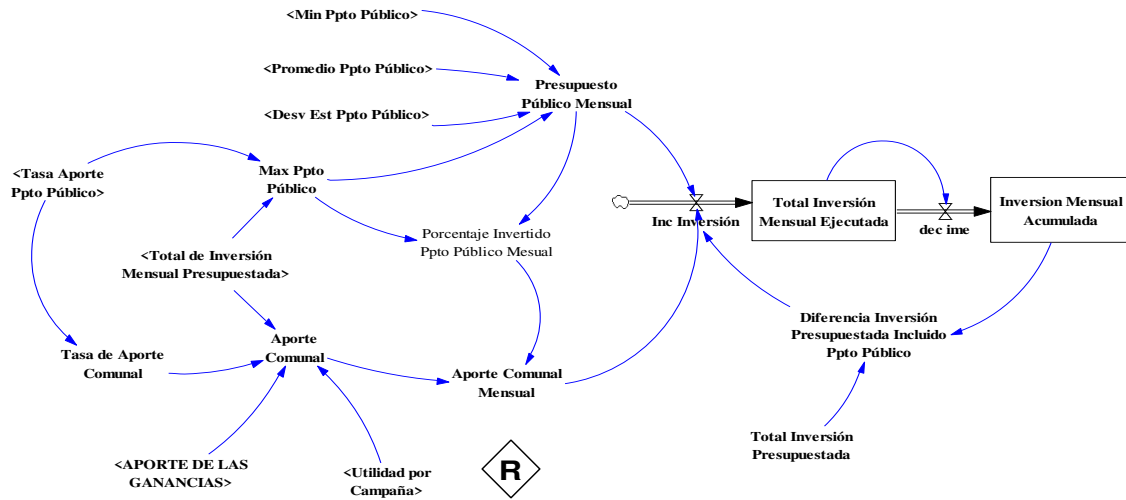
Una de las características importantes de este subsistema consiste en que recibe la retroalimentación del subsistema externo llamado mercado y según que el sistema tenga más utilidad mayor inversión recibirá el modelo productivo, los parámetros utilizados son enumerados en la tabla 19, La interacción de las variables de inversión mensual se muestra en la figura 32 y su comportamiento se rige según la ecuación 3.5.

**Tabla 16***Parámetros vista principal inversión de proyectos*

<b>VARIABLES</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Descripción</b>
Total Inversión Mensual Presupuestada	72217,00	S/.	El presupuesto mensual requerido para ejecutar el proyecto calculado por los proyectistas (incluye mano de obra, capacitación, etc.).
Tasa de aporte ppto publico	0,80	Porcentaje	Indica el porcentaje que es asumido por el tesoro público del total del presupuesto mensual requerido.
Tasa aporte comunal	0,20	Porcentaje	Complementa la inversión mensual presupuestada que tiene que ser por el aporte comunal.
Min ppto publico	57700,00	S/.	Parámetro de la función de probabilidad “ppto público mensual” indica la mínima cantidad de presupuesto que se puede asignar mensualmente.
Promedio ppto publico	57730,00	S/.	Parámetro de la función de probabilidad “ppto público mensual” indica el promedio de presupuesto que se puede asignar mensualmente.
Desv esta ppto publico	100,00	S/.	Parámetro de la función de probabilidad “ppto público mensual” indica la desviación estándar del presupuesto que se puede asignar mensualmente.
Aporte de las ganancias	0,15	Porcentaje	Es el porcentaje de aporte de las ganancias obtenidas con la interacción del mercado

**Figura 32**

*Diagrama de Forrester inversión mensual ejecutada*



$$Total\ Inversi3n\ Mensual\ Ejecutada = \begin{cases} \int (ACM + PPM) dt, & DIPIPP > 0 \\ \int (ACM) dt & , \quad DIPIPP \leq 0 \end{cases}$$

Ecuaci3n N° 3.5

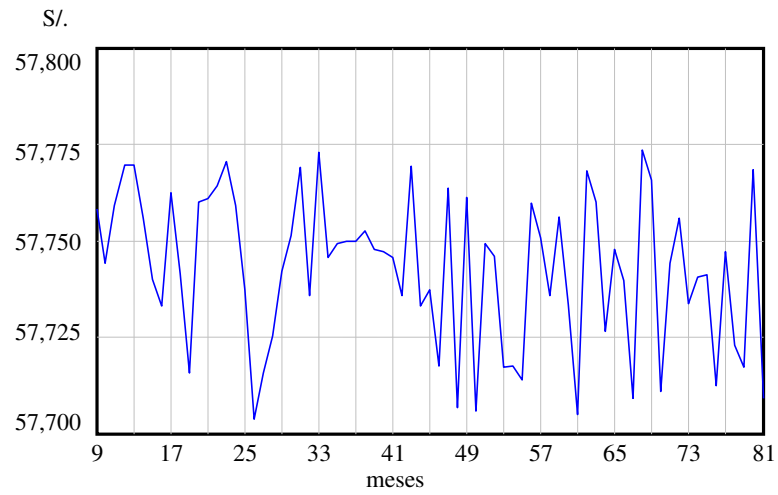
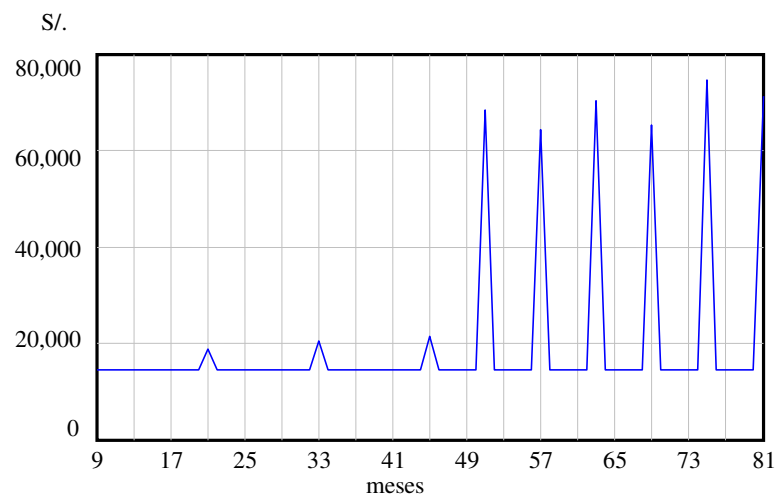
Donde:

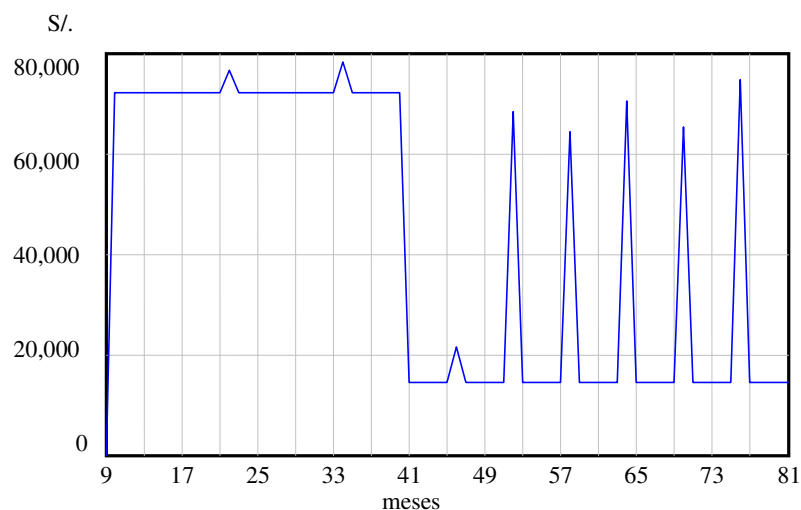
ACM : Aporte Comunal Mensual.

PPM : Presupuesto P3blico Mensual.

DIPIPP: Diferencia Inversi3n Presupuestada Incluido Presupuesto P3blico.

Como se puede observar las figuras 33, 34 y 35 el aporte de la inversi3n durante la ejecuci3n del proyecto es totalmente oscilatoria esto debido a que cuando se ejecut3 el proyecto ‘‘Pampaconga’’ eran constantes los recortes presupuestales seg3n la econom3a nacional; Sin embargo, si el proyectista observa una situaci3n econ3mica m3s estable puede variar los par3metros de la funci3n de probabilidad. Los picos bajos ocurren principalmente por recortes presupuestarios en el sector p3blico.

**Figura 33***Presupuesto público mensual***Figura 34***Aporte comunal*

**Figura 35***Total inversión mensual*

### **E. Subsistema capacitación**

Según el levantamiento de información en el ámbito del proyecto los regantes prácticamente no tienen “capacitación” antes de la ejecución del proyecto. El conocimiento de los usuarios es limitado sobre los aspectos como: eficiencia en la aplicación de técnicas de riego, eficiencia en aplicación de técnicas de cultivo y fortalecimiento organización de regantes.

Incluso en muchos proyectos, la escasez de agua se ha podido solucionar con la correcta administración del agua (técnicas de riego) y sin realizar obras civiles, como el caso de obras dejadas por otros proyectos como Foncodes. Asimismo, la mejor aplicación de técnicas de cultivo proporciona un mejor rendimiento de la campaña agrícola debido a que el cultivo de cada especie requiere de técnicas específicas.

Uno de los aspectos que se observa al momento de realizar la fase de estudios en el ámbito de intervención es el bajo o nulo grado de organización de los usuarios. Existen

proyectos donde existe abundante agua, pero los usuarios por factores internos a la comunidad son incapaces de organizarse para construir canales de riego y/o darles mantenimiento. Los parámetros utilizados son enumerados en la Tabla 17.

**Tabla 17**

*Parámetros de la vista capacitación*

<b>VARIABLES</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Descripción</b>
Tasa Asignación ppto. para Capacitación	0,15	Porcentaje	El porcentaje del presupuesto mensual que se asigna a la capacitación.
Peso Personal	0,50	Peso	El peso del personal en las capacitaciones.
Sueldo Promedio	2000,00	S/.	Sueldo promedio del personal técnico (ingenieros, antropólogos, etc.).
Total Requerimiento Personal	7,00	Personal Capacitación	Cuanto de personal técnico se requiere mensualmente.
Objetivo Capacitaciones por mes	4,00	Capacitaciones	Cuántas Capacitaciones por mes se programan.
Peso Equipos Operativos	0,30	Peso	El peso del equipo operativo en las capacitaciones (camionetas, proyectores, etc.).
Costo Promedio Operatividad Equipos	1000,00	S/.	Costo promedio para mantener operativo los equipos (mantenimiento, combustible, etc.).

Objetivo Capacitaciones por Proyecto	90,00	Capacitaciones	Total de capacitaciones objetivo a lograr con el proyecto.
Peso Material	0,20	Peso	El peso del material en las capacitaciones (útiles de oficina, insumos, equipos, etc.).
Costo Promedio Materiales	300,00	S/.	Costo promedio de los materiales para la capacitación.
Total Requerimiento Material	30,00	Material	Total de materiales requeridos mensualmente.
Total Requerimiento Equipos Operativos	24,00	Equipos	Total de equipos requeridos para el proyecto.
Eficiencia Aplicación Técnicas de Riego sin Proyecto	0,05	Porcentaje	Eficiencia calculada de la aplicación de técnicas de riego antes del proyecto
Eficiencias Aplicación Técnicas de Cultivo Sin proyecto	0,20	Porcentaje	Eficiencia calculada de la aplicación de técnicas de cultivo antes del proyecto.
Fortalecimiento de Organización de Regantes Sin Proyecto	0,15	Porcentaje	El grado de organización antes del proyecto.
Tasa de Aporte Técnicas de Riego por Capacitación	0,06	Porcentaje	Cuanto se aporta en cada capacitación a las técnicas de riego.
Tasa de Aporte Técnicas de Cultivo por Capacitación	0,07	Porcentaje	Cuanto se aporta en cada capacitación a las técnicas de cultivo.

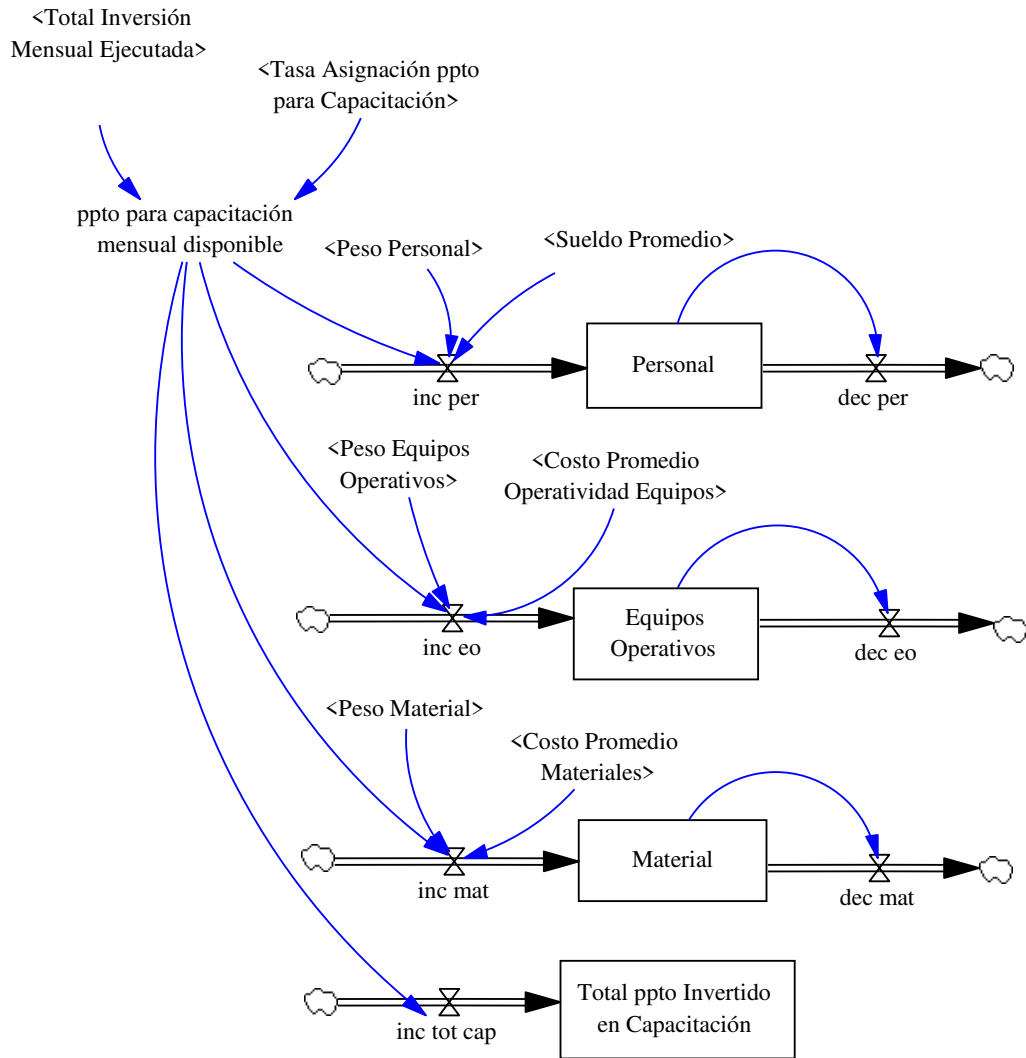
Tasa de Aporte de Fortalecimiento de Organización por Capacitación	0,065	Porcentaje	Cuanto se aporta en cada capacitación a la organización de regantes.
Administración del Agua sin Proyecto	0,15	Porcentaje	Cuán bien se administra el agua antes del proyecto.
Tasa de Aporte de Administración del Agua por Capacitación.	0,065	Porcentaje	Cuanto se aporta en cada capacitación a la administración del agua.

La figura 36 muestra la disponibilidad de recursos necesarios para llevar a cabo las capacitaciones (personal, equipos y materiales), recuerde que esta disponibilidad depende de la variable que proviene del subsistema Inversión “Total Inversión Mensual Ejecutada”; pues no siempre se logra tener todos los recursos mensuales programados.

La figura 37 muestra como la interacción de las variables contribuye a que los objetivos (Administración del Agua, Eficiencia Aplicación Técnicas de Riego, Eficiencia Aplicación Técnicas de Cultivo y Fortalecimiento Organización de Regantes) a lograr con la capacitación se alcanzan agrupando las variables de factor mensual y factor objetivo; su comportamiento se rige según la ecuación N° 3.6.

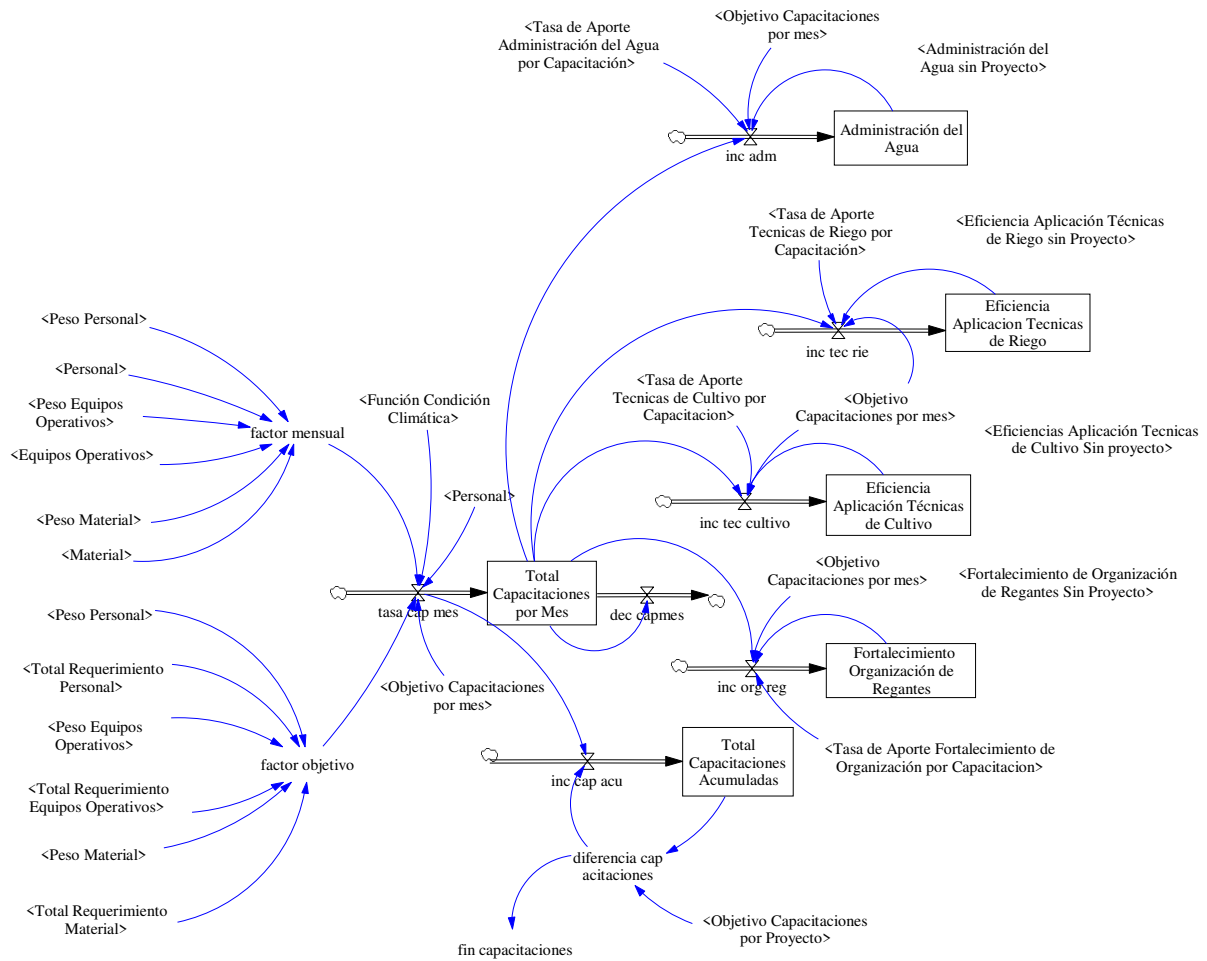
**Figura 36**

*Diagrama de Forrester disponibilidad de recursos para capacitación*



**Figura 37**

*Diagrama de Forrester capacitaciones por mes*



$$Total\ Capacitaciones\ por\ Mes = \int \left( \frac{FM * OCM}{FO} \right) * FCC dt$$

Ecuación N° 3.6

Donde:

FM : Factor Mensual.

OCM : Objetivo Capacitaciones por Mes.

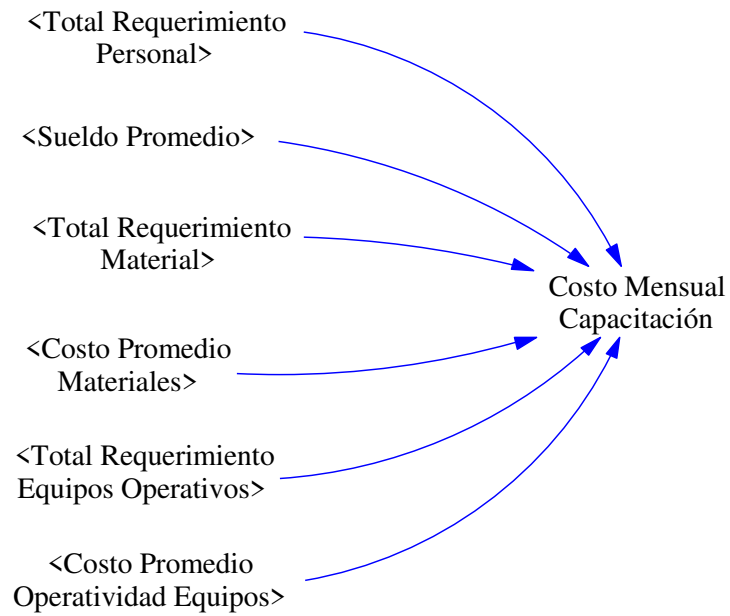
FO : Factor Objetivo.

FCC : Función Condición Climática.

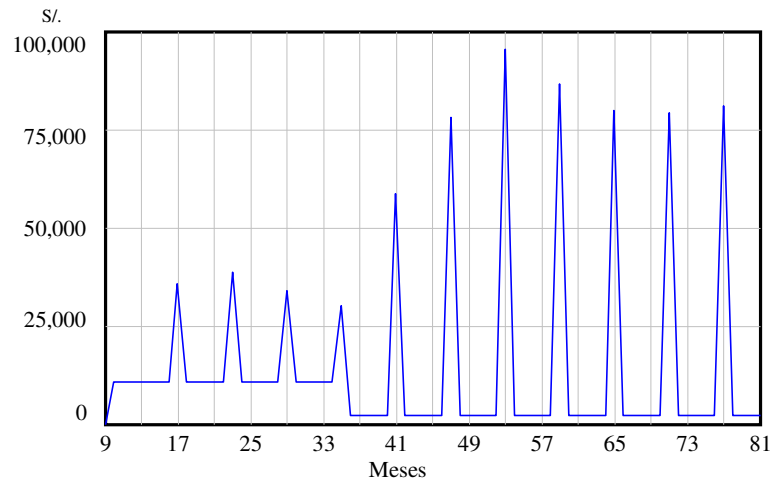
La figura 38 muestra las variables que intervienen en el costo mensual de capacitación.

**Figura 38**

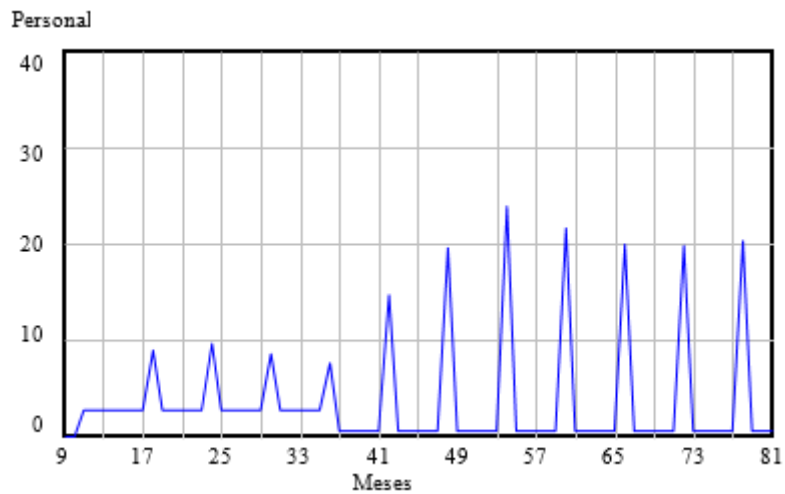
*Diagrama causa efecto de costo mensual de capacitación*

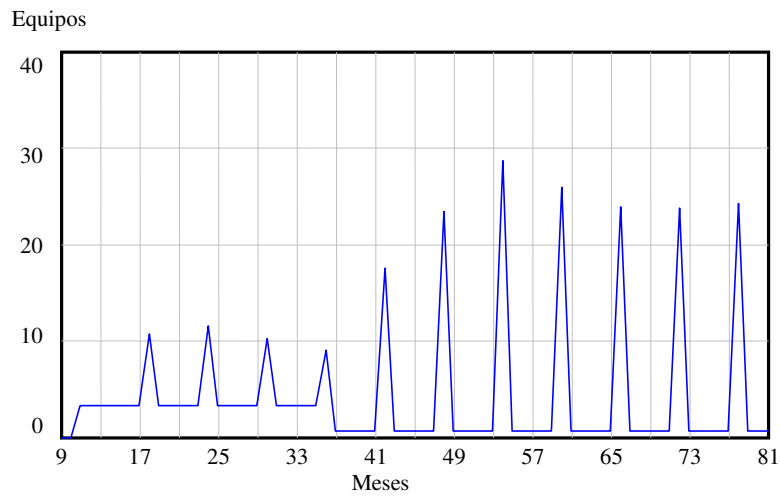
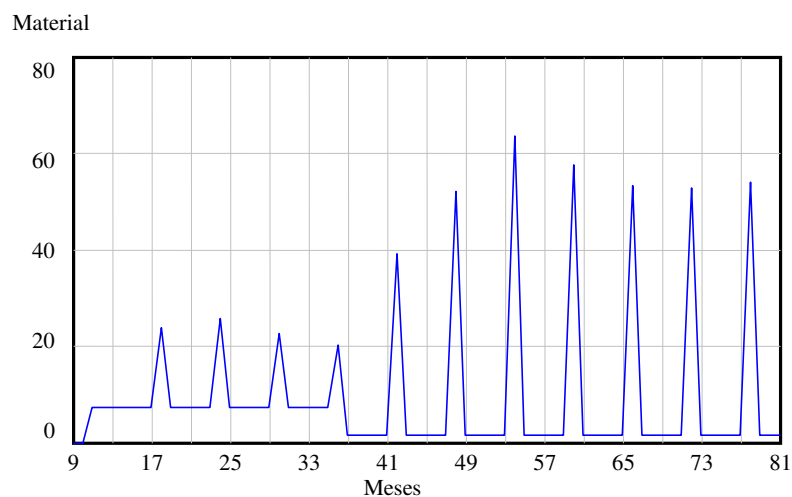


El subsistema inversión predispone la disponibilidad de recursos para el sistema, La figura 39 muestra la disponibilidad del presupuesto para el desarrollo de las jornadas de capacitación.

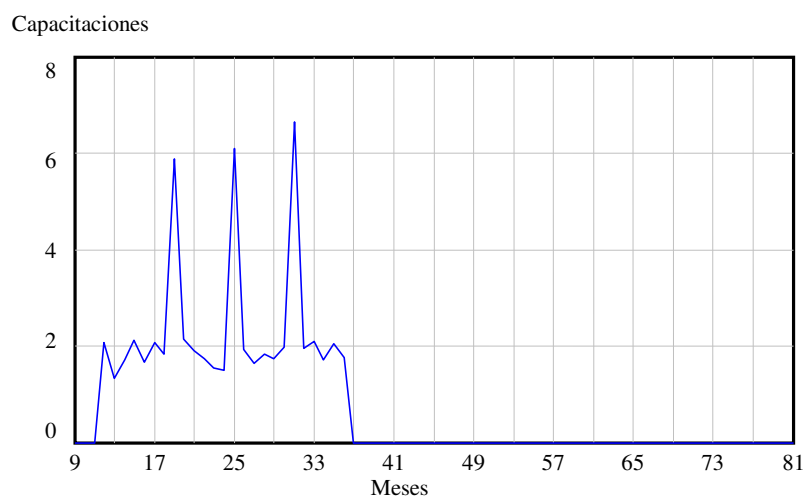
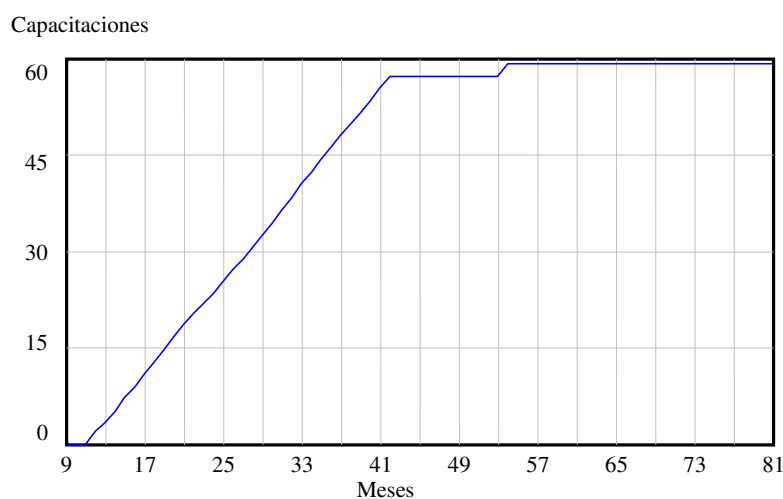
**Figura 39***Presupuesto para capacitación mensual disponible*

Según el presupuesto disponible mostrado la figura 39. Este se requiere para personal, equipos operativos y materiales para capacitación cuyos valores durante el proyecto se muestran las figuras 40, 41 y 42.

**Figura 40***Disponibilidad de personal para capacitación*

**Figura 41***Disponibilidad de equipos para capacitación***Figura 42***Disponibilidad de material para capacitación*

La disponibilidad de recursos exacta mostrada en las figuras 40, 41 y 42 determinan el número de capacitaciones que se pueden llevar a cabo mensualmente según la figura 43, la figura 44 muestra que en el mes 45 se logra a alcanzar el total de capacitaciones programadas para el proyecto.

**Figura 43***Total capacitaciones por mes***Figura 44***Total capacitaciones acumuladas*

La disponibilidad de recursos para capacitaciones influye en el incremento de los factores en los que el proceso de capacitación como son: administración del agua, fortalecimiento de organización de regantes, eficiencia aplicación técnicas de riego, y eficiencia aplicación técnicas de cultivo.

## **F. Subsistema obras**

El subsistema obras explica del desarrollo de infraestructura civil en el proyecto. Mediante las obras se logra la mayor captación del recurso hídrico ya sea mediante represas,

canales de riego, rápidas, reservorios, etc.; asimismo, la conducci3n del agua es importante pues en canales de riego de tierra existe un alto porcentaje de filtraci3n y por ende perdida del recurso hídrico en el proceso de transporte del agua. Es importante mencionar que en muchos proyectos el agua es trasladada incluso por varios kil3metros.

El resultado del subsistema obras influye en el subsistema agua para riego aportando a la mayor captaci3n del recurso hídrico; los parámetros que se utilizan se muestran en la tabla 21.

**Tabla 18**

*Parámetros vista obras*

<b>Variables</b>	<b>Valor inicial</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Descripci3n</b>
Tasa Asignaci3n Ppto para Obras	0,85	Porcentaje	Porcentaje del presupuesto mensual asignado a obras.
Objetivo Avance Mensual de Obra	2950,00	Metros	Metraje de la obra que debe avanzarse mensualmente.
Objetivo Obra por Proyecto	20273,00	Metros	Metraje de la obra que debe alcanzarse una vez culminada la obra.
Obra Inicial Sin Proyecto	0,00	Metros	Obra existente en el ámbito de intervenci3n antes de iniciar el proyecto.
Peso Personal Técnico	0,06	Peso	Peso del personal técnico en el avance de la obra.
Sueldo Promedio	2000,00	S/.	Sueldo promedio del personal técnico que participa en el desarrollo de obras (ing. civil, top3grafos, etc.)

---

Personal				
Técnico				
Total	8,00	Personal	Total de personal técnico por mes	
Requerimiento		técnico		
Personal				
Técnico				
Peso Equipos	0,24	Peso	Peso del equipo operativo en el avance de la obra.	
Operativos				
Obras				
Costo Equipos	4000,00	S/.	Costo promedio para mantener operativo los equipos (mantenimiento, combustible, etc.)	
Operativos				
Obras				
Total	16,00	Equipos	Total de equipos que se requieren mensualmente para lograr el metraje programado por mes.	
Requerimiento				
Equipos				
Operativos				
Obras				
Peso Personal	0,59	Peso	Peso del personal obrero en el avance de la obra.	
Obrero				
Sueldo	800,00	S/.	Sueldo promedio del obrero que participa en el desarrollo de obras (capataces, peones, oficiales, etc.)	
Promedio				
Personal Obrero				
Total	200,00	Personal	Total de personal obrero requerido por mes	
Requerimiento		obrero		
Personal Obrero				
Peso Material de	0,11	Peso	Peso del material de obras en el avance de la obra.	
Obras				
Costo Material	15,00	S/.	Costo promedio del material utilizado en la obra.	
de Obras				

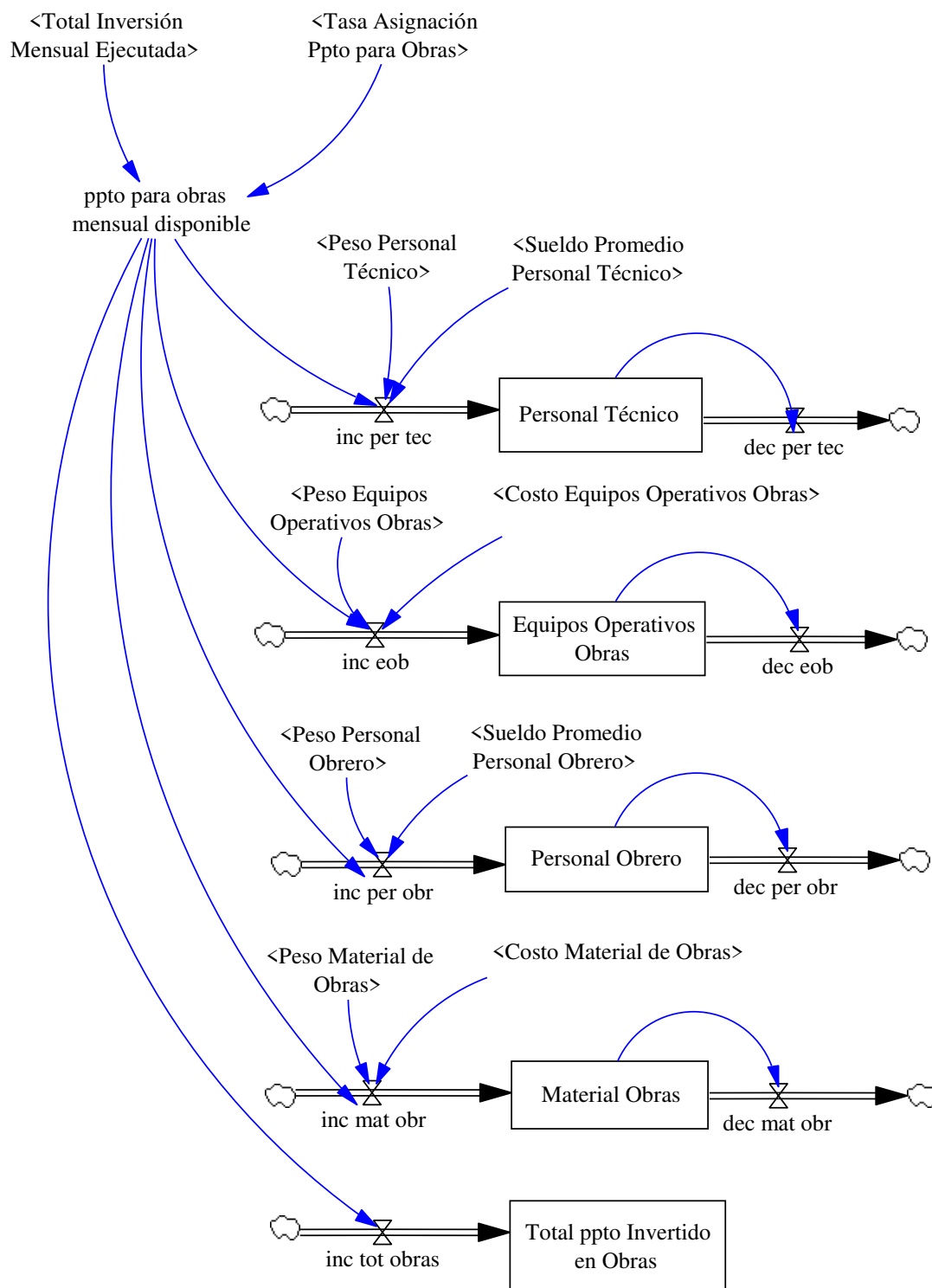
---

Total	2000,00	Material de	Cantidad de material de obra requerido
Requerimiento		obra	para el avance mensual de la obra.
Material de			
Obras			

La figura 45 muestra el diagrama de Forrester que explica la disponibilidad de recursos necesarios para lograr el avance de la obra (personal técnico, equipos operativos, personal obrero y material obras), es necesario recordar que esta disponibilidad depende de la variable que proviene del subsistema Inversión “Total Inversión Mensual Ejecutada”; pues no siempre se logra tener todos los recursos mensuales programados, siendo estos proyectos considerados de ayuda social son los primeros en sufrir recortes presupuestales en condiciones económicas adversas para el país.

Figura 45

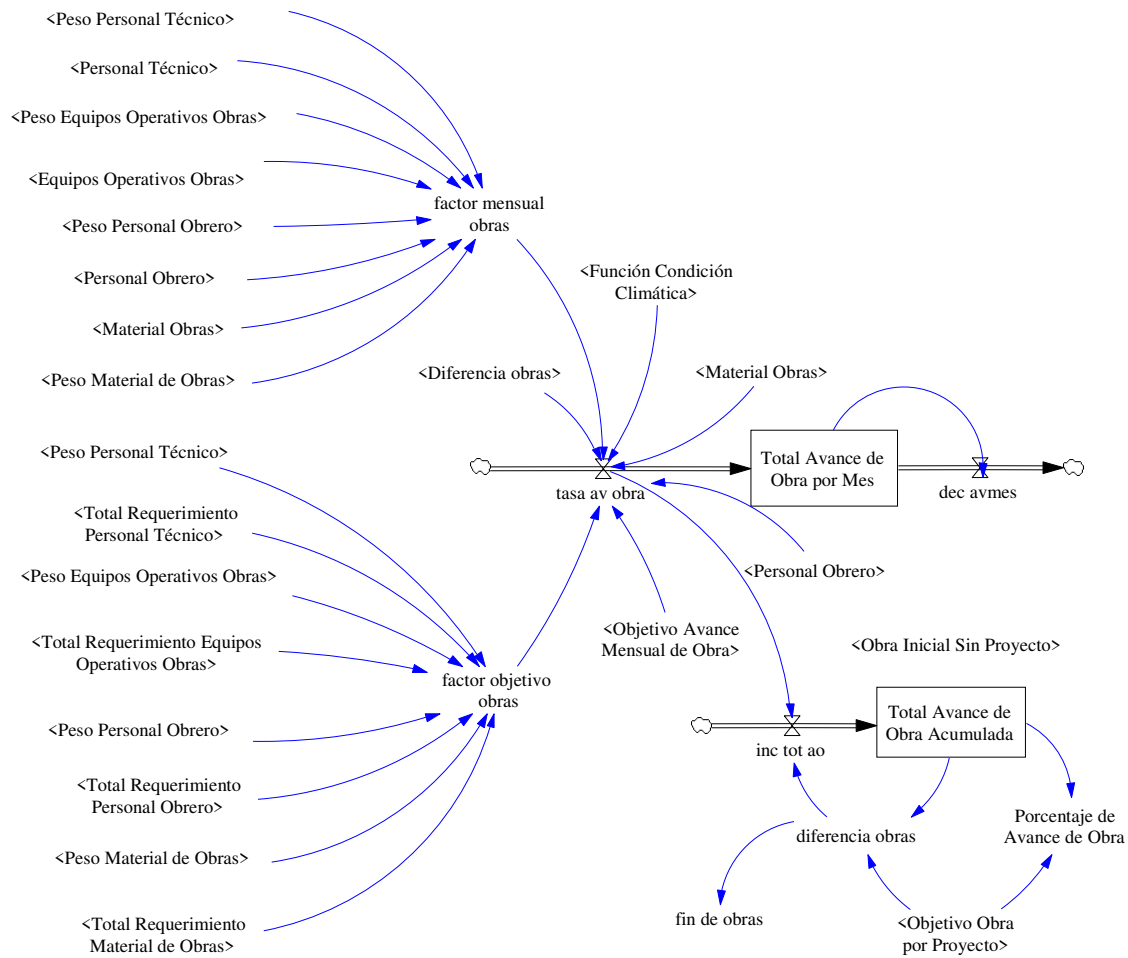
Diagrama de Forrester disponibilidad de recursos para obras



La figura 46 muestra la interacción de los recursos disponibles para lograr el avance de obra de obra mensual, el mismo se rige por la ecuación 3.6.

**Figura 46**

*Diagrama de Forrester avance de obras mensual*



$$Total\ Avance\ de\ Obra\ por\ Mes = \int \left( \left( \left( FMO * \frac{OAMO}{FOO} \right) * FCC \right) - DAM \right) dt$$

Ecuación N° 4.6

Donde:

FMO : Factor Mensual Obras.

OCM : Objetivo Avance Mensual de Obra.

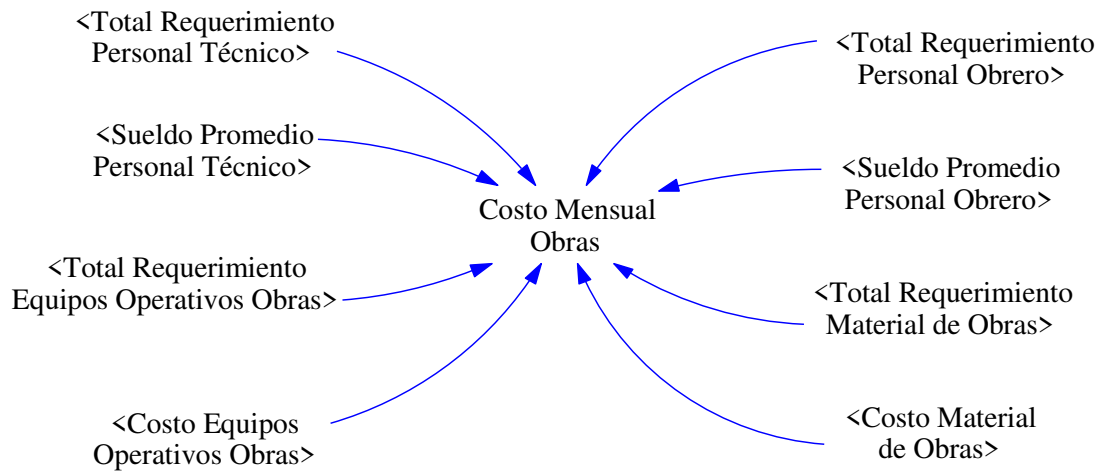
FOO : Factor Objetivo Obras.

FCC : Función Condición Climática.

DAM : Decremento Avance Mensual.

**Figura 47**

*Diagrama causa efecto de costo mensual de obras*



La ecuación 3.7 explica el costo de obras mensual

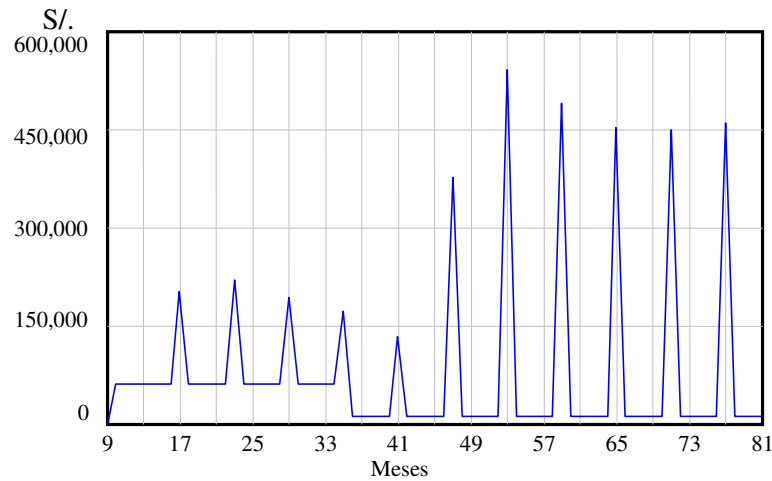
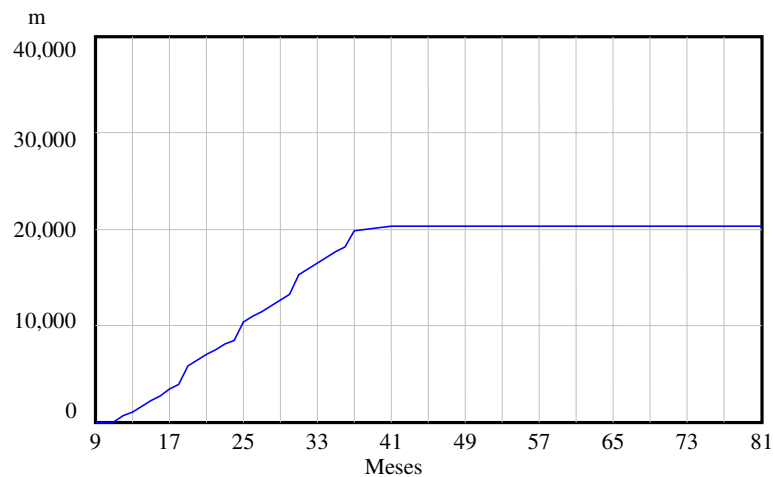
$$\text{Costo Mensual Obras} = CEOO * TREOO + SPPT * TRPT + CMO * TRMO + SPPO * TRPO$$

Ecuación N° 3.7

Donde:

- CEOO : Costo Equipo Operativo Obras.  
 TREOO : Total Requerimiento Equipos Operativos Obras.  
 SPPT : Sueldo Promedio Personal Técnico.  
 TRPT : Total Requerimiento Personal Técnico.  
 CMO : Costo Material de Obras.  
 TRMO : Total Requerimiento Material de Obras.  
 SPPO : Sueldo Promedio Personal Obrero.  
 TRPO : Total Requerimiento Personal Obrero.

Según el presupuesto disponible mostrado en la figura 48 este se reparte en personal técnico, equipos operativos, personal obrero y material. La figura 49 muestra que en el mes 32 se logra a alcanzar el total de metraje de obra programada para el proyecto.

**Figura 48***Presupuesto mensual disponible para obras***Figura 49***Total avance de obra mensual*

## G. Subsistema producción

El subsistema producción muestra el resultado de la interacción de los subsistemas que han sido expuestos en las secciones anteriores y que determinan las condiciones de producción, para el caso sólo se ha considerado un solo producto (papa) por simplicidad (debido a la gran cantidad de variables). Sin embargo, si se requiere añadir al modelo más productos sólo se

deben añadir más modelos bajo la misma lógica utilizada para el producto1 (prod1) y posteriormente se deben sumar las producciones.

**Tabla 19**

*Parámetros de la vista producción*

<b>VARIABLES</b>	<b>Valor inicial</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Descripción</b>
Peso factor agua prod 1	0,60	Peso	Peso del agua para obtener la producción
Peso factor insumo prod 1	0,10	Peso	Peso de los insumos para obtener la producción
Peso factor capacitación prod 1	0,15	Peso	Peso de la capacitación para obtener la producción
Peso factor maquinaria prod 1	0,1	Peso	Peso de la maquinaria para obtener la producción
Peso factor recursos humanos prod 1	0.05	Peso	Peso de recursos humanos para obtener la producción
% de terreno necesario prod 1	0,10	Porcentaje	Porcentaje del terreno agrícola asignado al producto 1
Producción objetivo prod 1	1,00	Porcentaje	Objetivo a lograr con la producción
Peso tierra de cultivo adecuada prod 1	1,00	Peso	Peso de la tierra de cultivo adecuada para obtener la producción.
Factor crecimiento mensual prod 1	0,40	Porcentaje	Factor de crecimiento mensual del cultivo prod1
Límite Tiempo de Maduración prod 1	6,00	Mes	Número de meses en los que se debe terminar la cosecha.

---

Insumos requeridos prod1	Varios	Kg	La cantidad de insumos requeridos por mes según el tipo de producto
Función 1 insumos disponibles prod 1	Aleatorio	Kg	Función de probabilidad normal cuyos valores de retorno son la posible cantidad de insumos disponibles para la producción en los meses de enero a mayo
Min func 1	19,00	Kg	Valor mínimo para la función de probabilidad “función 1 insumos disponibles prod 1”
Max func 1	97,00	Kg	Valor máximo para la función de probabilidad “función 1 insumos disponibles prod 1”
Prom func 1	67,00	Kg	Valor promedio para la función de probabilidad “función 1 insumos disponibles prod 1”
Desvest func 1	31,00	Kg	Valor de la desviación estándar para la función de probabilidad “función 1 insumos disponibles prod 1”
Función 2 insumos disponibles prod 1	Aleatorio	Kg	Función de probabilidad normal cuyos valores de retorno son la posible cantidad de insumos disponibles para la producción en los meses de octubre a diciembre.
Min func 2	8,00	Kg	Valor mínimo para la función de probabilidad “función 2 insumos disponibles prod 1”
Max func 2	75,00	Kg	Valor máximo para la función de probabilidad “función 2 insumos disponibles prod 1”

---

Prom func 2	39,00	Kg	Valor promedio para la función de probabilidad “función 2 insumos disponibles prod 1”
Desvest func 2	33,00	Kg	Valor de la desviación estándar para la función de probabilidad “función 2 insumos disponibles prod 1”
Maquinaria requerida prod1	Varios	hr/maquina	La cantidad de horas máquina requeridos por mes según el tipo de producto
Función 1 maquinaria disponible prod1	Aleatorio	hr/maquina	Función de probabilidad normal cuyos valores de retorno son la posible cantidad de horas/máquina disponibles para la producción en los meses de enero a mayo
Min func m1	4,75	hr/maquina	Valor mínimo para la función de probabilidad “función 1 maquinaria disponibles prod 1”
Max func m1	24,25	hr/maquina	Valor máximo para la función de probabilidad “función 1 maquinaria disponibles prod 1”
Prom func m1	17,75	hr/maquina	Valor promedio para la función de probabilidad “función 1 maquinaria disponibles prod 1”
Desvest func m1	10,00	hr/maquina	Valor de la desviación estándar para la función de probabilidad “función 1 maquinaria disponibles prod 1”
Función 2 maquinaria disponible prod 1	Aleatorio	hr/maquina	Función de probabilidad normal cuyos valores de retorno son la posible cantidad de horas/máquina disponibles

---

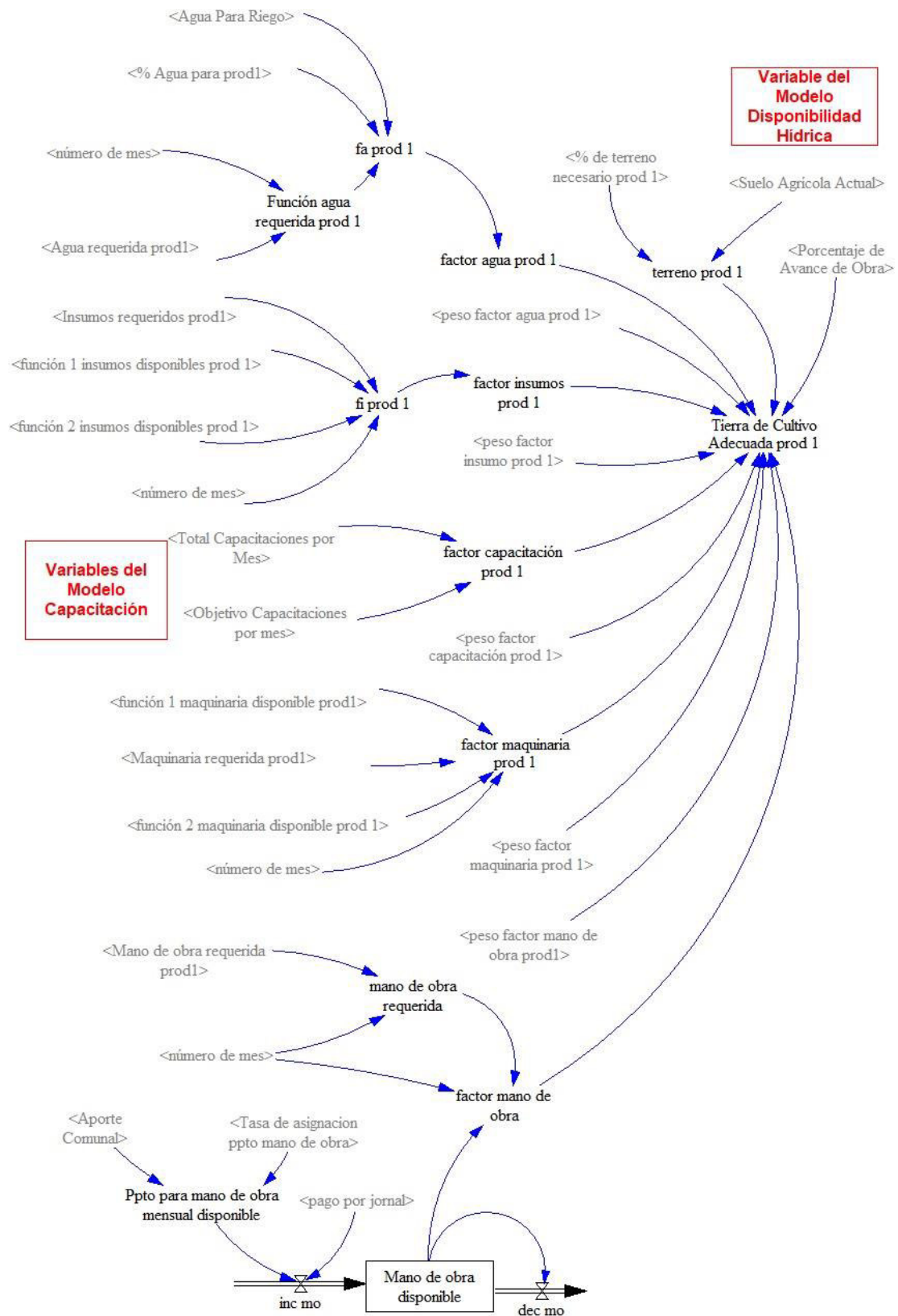
			para la producción en los meses de octubre a diciembre.
Min func m2	2	hr/maquina	Valor mínimo para la función de probabilidad “función 2 maquinaria disponibles prod 1”
Max func m2	18,75	hr/maquina	Valor máximo para la función de probabilidad “función 2 maquinaria disponibles prod 1”
Prom func m2	10,08	hr/maquina	Valor promedio para la función de probabilidad “función 2 maquinaria disponibles prod 1”
Desvest func m2	8,00	hr/maquina	Valor de la desviación estándar para la función de probabilidad “función 2 maquinaria disponibles prod 1”
% Agua para prod1	0,65	porcentaje	Porcentaje de agua de riego destinada para producto 1
Agua requerida prod1	Varios	m3	Agua requerida para producto1

---

En el modelo propuesto en la figura 50 se muestra la interacción de variables tierra, agua, insumos, capacitación y maquinaria; cuya interacción se resumen en una sola variable “tierra de cultivo adecuada”, según la cantidad de tierra de cultivo adecuada (para la producción) que se obtenga en el sistema, se predispone la cantidad de productos que el sistema es capaz de producir, la ecuación N° 3.8 rige el comportamiento del modelo.

**Figura 50**

*Diagrama de Forrester tierra de cultivo adecuada*



$$\begin{aligned}
 & \text{Tierra de Cultivo Adecuada} = \\
 & \begin{cases} 0, & FAP \leq 0 \\ (FAP * PFAP + FIP * PFIP + FCP * PFCP + FMP * PFMP + FRH * PFRH) * TP, & FAP > 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

## Ecuación N° 3.8

Donde:

FAP : Factor agua para producto.

PFPA : Peso factor agua para producto.

FIP : Factor insumo para producto.

PFIP : Peso factor insumo para producto.

FCP : Factor capacitación para producto.

PFCP : Peso factor capacitación para producto.

FMP : Factor maquinaria para producto.

PFMP : Peso factor maquinaria para producto.

FRH : Factor recursos humanos.

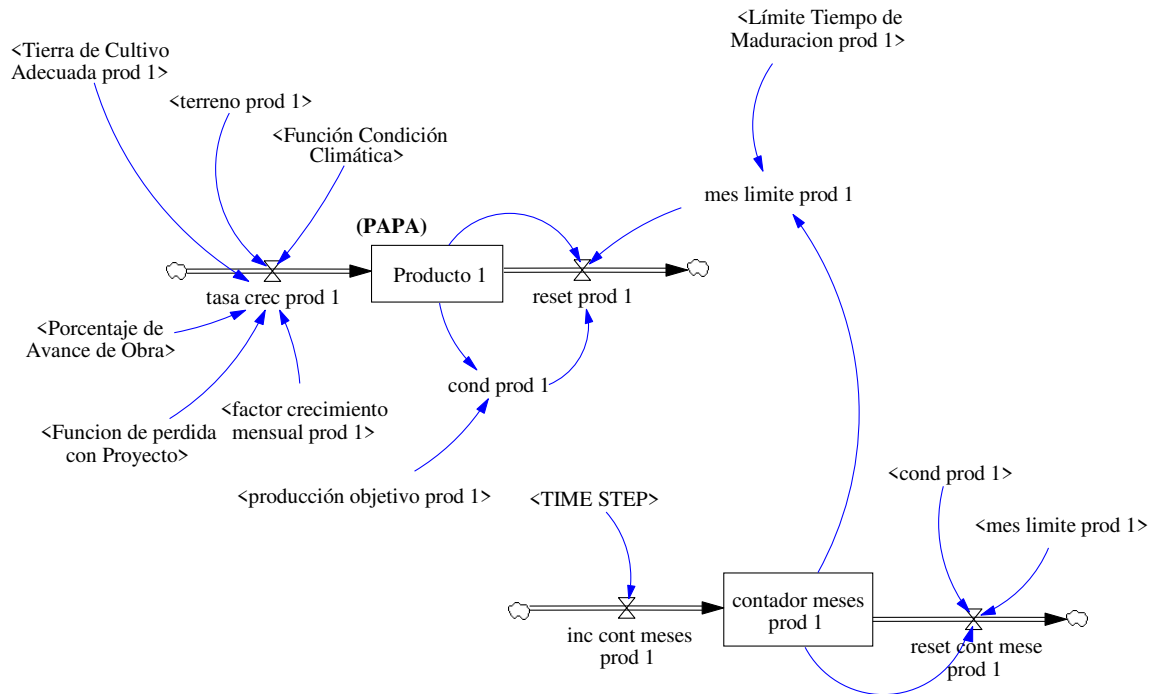
PFRH : Peso factor recursos humanos.

TP : Terreno para el Producto.

En el modelo propuesto en la figura 51, se observa principalmente que según los recursos disponibles los cuales predisponen la variable tierra de cultivo adecuada y según la condición climática adecuada se predispone la posible maduración del producto (para el caso de la papa); para este modelo no se toma en cuenta unidades de medida de la producción, sino el porcentaje de maduración que se le permite al producto de 0 al 100%; según un porcentaje mínimo planteado en modelos que se explican en secciones posteriores se puede determinar si hubo o no producción en una determinada campaña, esto de acuerdo a si se cumple un valor mínimo establecido por la variable “Límite tiempo de Maduración prod 1”, es decir que si antes de llegar al límite de maduración del producto (6 meses según la tabla 22) simplemente se considera que en esa campaña hubo pérdida de la producción, la ecuación 3.9 rige el comportamiento del modelo.

Figura 51

Diagrama de Forrester de producto



$$\text{Produccion}(t) = \begin{cases} \int \left( \left( \frac{TCAP(t)}{TP(t)} \right) * FCMP(t) * FPP(t) \right) - RP(t) dt, & PAO > 0 \\ \int \left( \left( \left( \frac{TCAP(t)}{TP(t)} \right) * FCM(t) \right) * FCC(t) \right) - RP(t) dt, & PAO \leq 0 \end{cases}$$

Ecuación N° 4.9

Donde:

PAO : Porcentaje Avance de Obra.

TCAP : Tierra de Cultivo Adecuada para Producto.

TP : Terreno para Producto.

FCM : Factor de Crecimiento Mensual para Producto.

FPP : Función de Perdida con Proyecto.

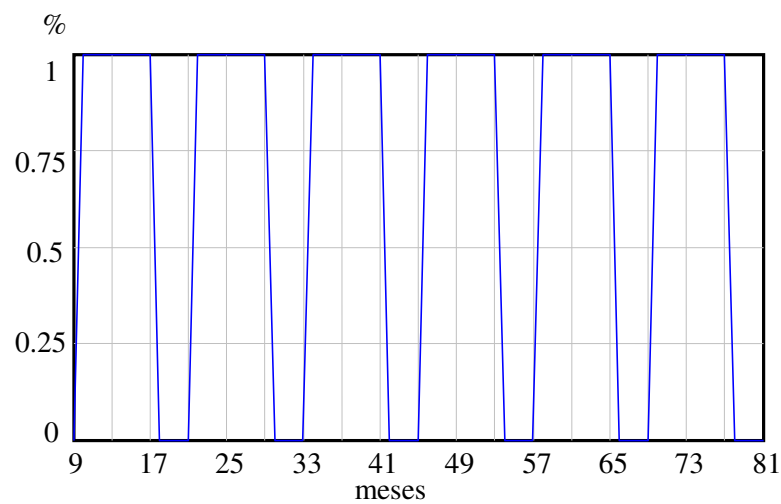
FCP : Función Condición Climática.

RP : Reset de Producción.

Las figuras 52, 53, 54 y 55 muestran los valores que asumen después de la simulación las variables “factor agua prod1”, “factor insumos prod1”, “factor capacitación prod1” y “factor maquinaria prod 1”; para el caso de las variables cuyos valores son de 0 a 1 indican la relación entre los valores existentes y los valores objetivos de cada variable de 0 al 100%.

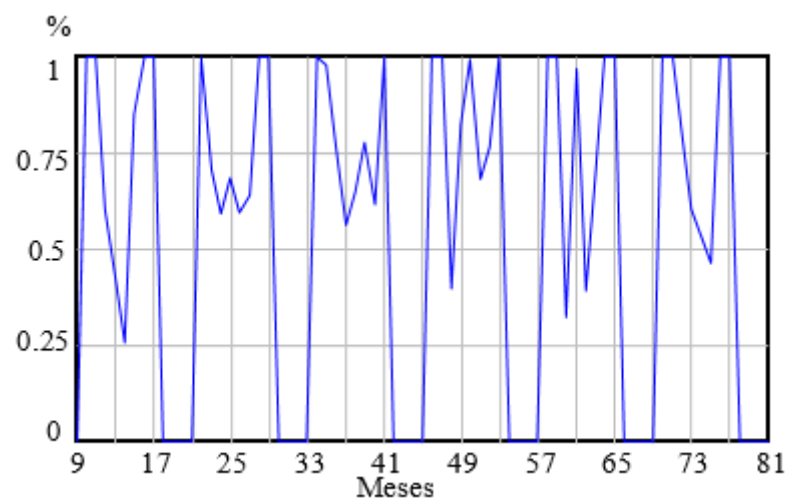
**Figura 52**

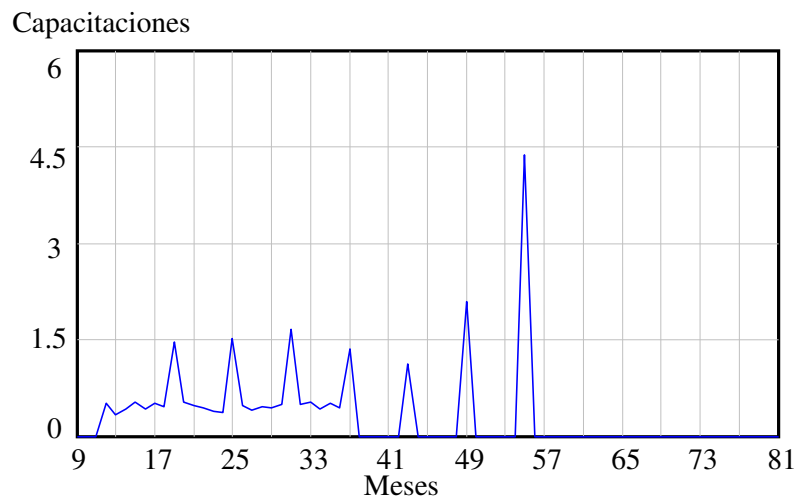
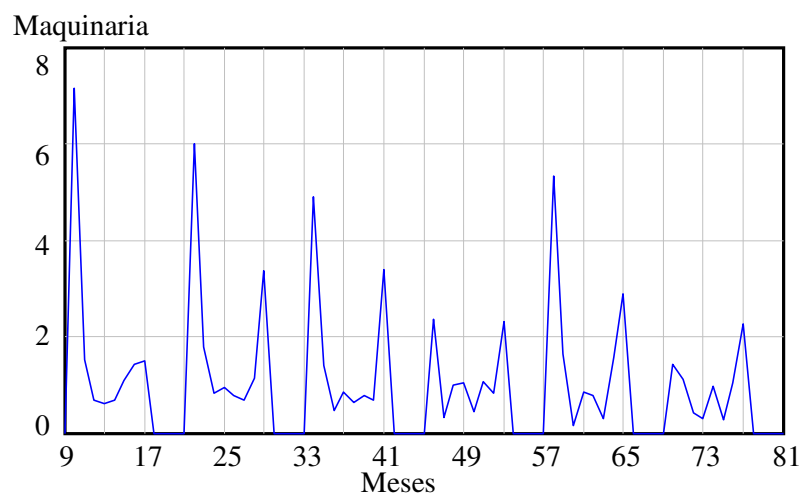
*Factor agua disponible para producto*



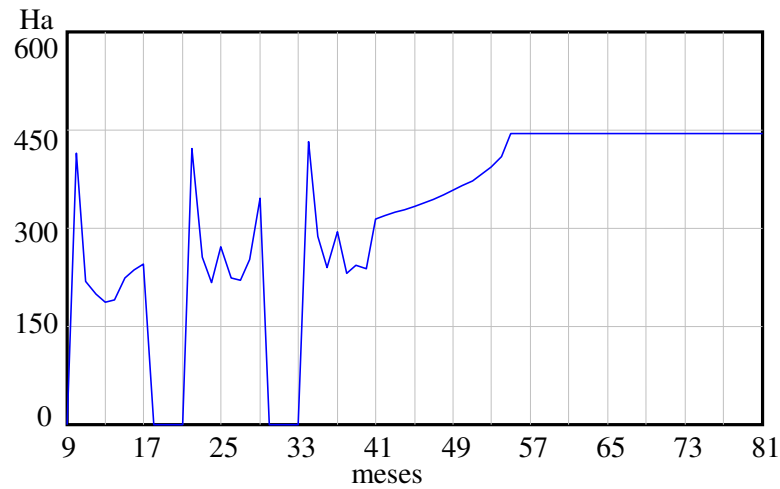
**Figura 53**

*Factor insumos para producto*

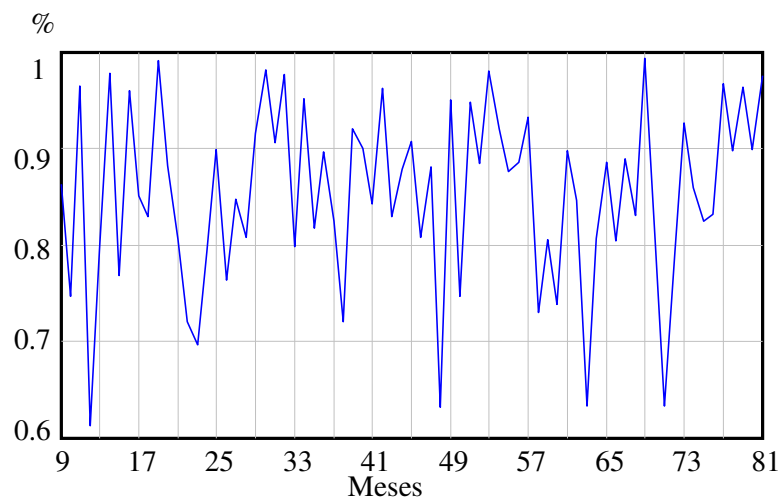


**Figura 54***Factor capacitación para producto***Figura 55***Factor maquinaria para producto*

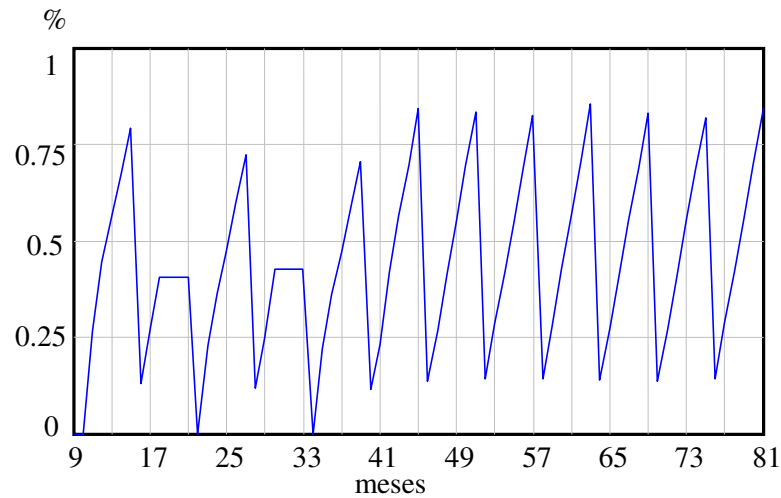
La figura 56 muestra la cantidad de tierra de cultivo adecuada para la producción medida en hectáreas, producto de los factores explicados anteriormente y que predispone la producción del sistema.

**Figura 56***Tierra de cultivo adecuada para producto*

La figura 57 muestra el comportamiento de la condición climática durante la ejecución del proyecto siendo 1 (el máximo valor) una condición climática 100% favorable.

**Figura 57***Función condición climática*

La figura 58 se puede observar el grado de maduración que la variable “producto 1” pudo lograr durante el tiempo de cosecha que ha sido configurado a 06 meses en la variable “Límite de tiempo de maduración”. Obsérvese que los valores van de 0 a 1, lo cual indica 0 a 100% de maduración del producto1.

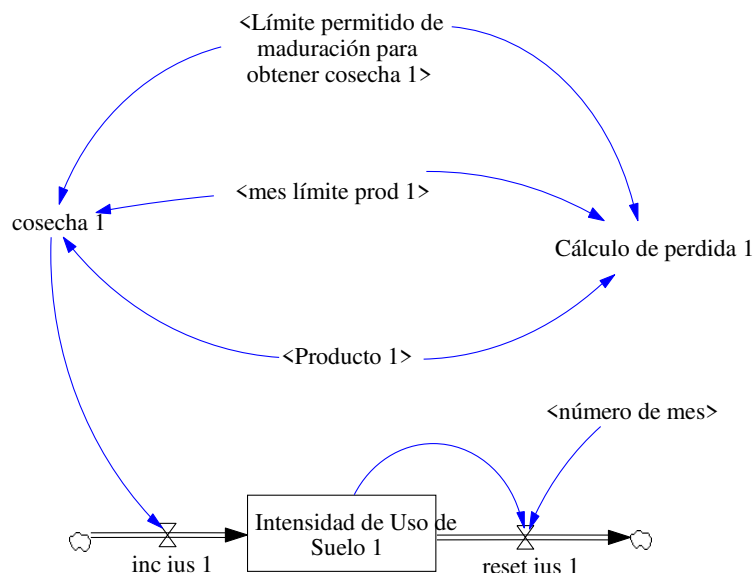
**Figura 58***Producto (porcentaje de producción)***H. Cálculo de intensidad de uso de suelo**

El cálculo de la intensidad de uso de suelo se considera como una métrica del subsistema producción que indica la cantidad de cosechas que pueden obtenerse por año. Según la experiencia obtenida de proyectos implementados, antes de la ejecución del proyecto sólo se puede obtener una cosecha por año; con el adecuado incremento de recursos no sólo se garantiza el cultivo sino también se incrementa el número de cosechas por año (intensidad de uso de suelo), su único parámetro es la variable “Límite permitido de maduración para obtener cosecha”, en el gráfico N° 4.35 se observa la tasa de maduración del producto alcanzada; sin embargo, esta debe lograr un valor mínimo para considerar que hubo cosecha, para el caso asumimos un valor de 0.5 (50%) para la variable “Límite permitido de maduración para obtener cosecha” el mismo que puede ser cambiado según requerimientos del proyectista.

**Tabla 20***Parámetros de intensidad de uso de suelo*

<b>Variab</b> les	<b>Valor Inicial</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Descripción</b>
Límite permitido de maduración para obtener cosecha 1	0,50	Porcentaje	Porcentaje mínimo de maduración que debe alcanzar el producto para que se pueda considerar si se puede obtener cosecha.

La figura 59 muestra las variables que intervienen en el proceso de calcular la intensidad de uso de suelo, la variable “cosecha 1” indica si se puede lograr una cosecha, la variable “cálculo de pérdida 1” indica que porcentaje de pérdida se obtuvo por campaña agrícola, la ecuación 3.10 rige el comportamiento del modelo.

**Figura 59***Diagrama de Forrester intensidad uso de suelo*

$$Intensidad\ de\ Uso\ de\ Suelo(t) = \begin{cases} 0, & Producto\ 1 < LPMOC \\ \int (Producto\ 1(t) - RIUS) dt, & Producto\ 1 \geq LPMOC \end{cases}$$

## Ecuación N° 3.10

Donde:

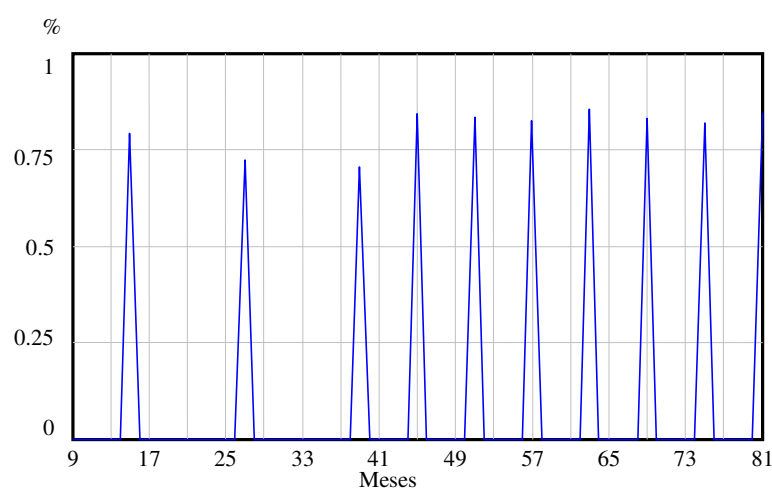
LPMOC: Límite permitido de maduración para obtener cosecha.

RIUS : Reset intensidad uso de suelo.

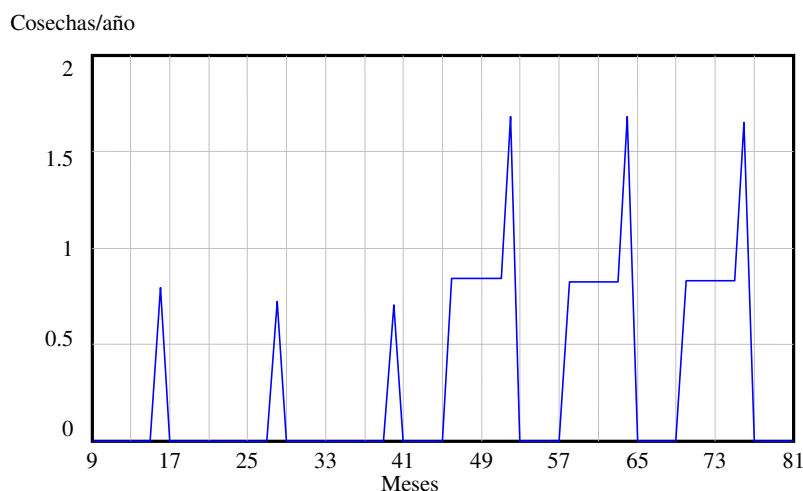
La figura 60 muestra los meses donde se obtuvieron cosecha considerando el valor mínimo que debieron lograr.

**Figura 60**

*Comportamiento de la variable Cosecha*



La figura 61 se puede observar que la intensidad de uso de suelo llega hasta 1.67 campañas por año; en comparación de 01 campaña antes del mes 41 (que puede considerarse como falta de implementación del proyecto); con lo cual también se incrementa la calidad de vida del campesino y sus ingresos económicos.

**Figura 61***Intensidad de uso de suelo***I. Cálculo de volumen de producción**

El cálculo del volumen de producción se podría considerar una métrica del subsistema producción, pues como se explicó en el subsistema producción este solamente indica la tasa de maduración lograda por un producto.

Para poder convertir en unidades de medida la producción, antes se debe verificar si existe cosecha en la variable “cosecha1”; además se debe considerar los niveles de rendimiento por cosecha lo cual está reflejado en la función de probabilidad normal “f producción(t)”.

**Tabla 21***Parámetros de f producción(t)*

<b>VARIABLES</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Descripción</b>
Min f producción	1 920 000,00	Kg	Valor mínimo para la función de probabilidad “f producción 1”.
Max f producción	1 972 000,00	Kg	Valor máximo para la función de probabilidad “f producción 1”.

Prom f producción	1 972 000,00	Kg	Valor promedio para la función de probabilidad “f producción 1”.
Desvest f producción	20 000,00	Kg	Valor de la desviación estándar para la función de probabilidad “f producción 1”.

La figura 62 muestra la interacción de variables para calcular el volumen de producción (Kg) siempre y cuando exista cosecha según la ecuación 4.11 de la variable “cosecha”.

$$cosecha = \begin{cases} 0, & Produccion(t) < LPMOC \\ Produccion(t), & Produccion(t) \geq LPMOC \end{cases}$$

Ecuación N° 4.11

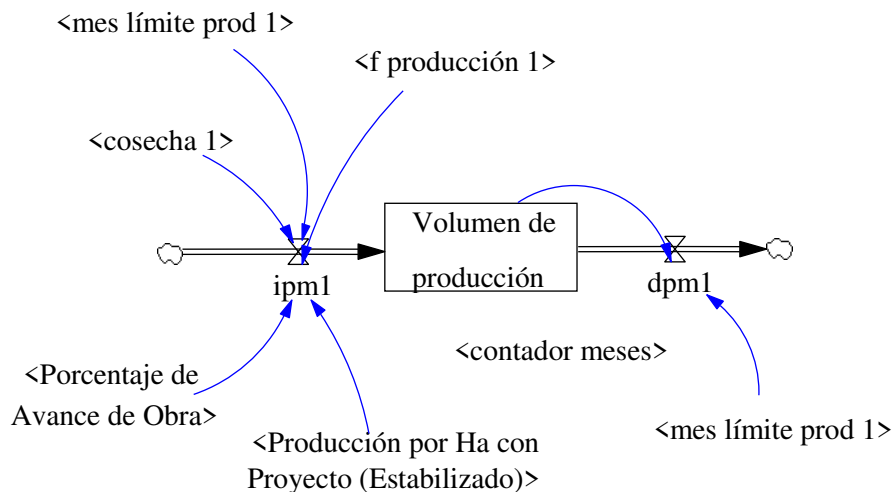
Donde:

Produccion(t) : vea la ecuación 4.9

LPMOC : Límite permitido de maduración para obtener cosecha.

### Figura 62

Diagrama de Forrester de volumen de producción



$$Volumen\ de\ producción = \begin{cases} \int [cosecha * PHaPE(t)]dt & , \quad PAO > 1 \\ \int [fproduccion(t)]dt & , \quad PAO \leq 1 \end{cases}$$

Ecuación N° 4.12

Donde:

Cosecha: ver ecuación 4.11

PHaPE: Producción por Ha con proyecto estabilizado.

PAO : Porcentaje de avance de obra.

$$PHaPE = PHaSP * IPPP * TCOP$$

Ecuación N° 4.13

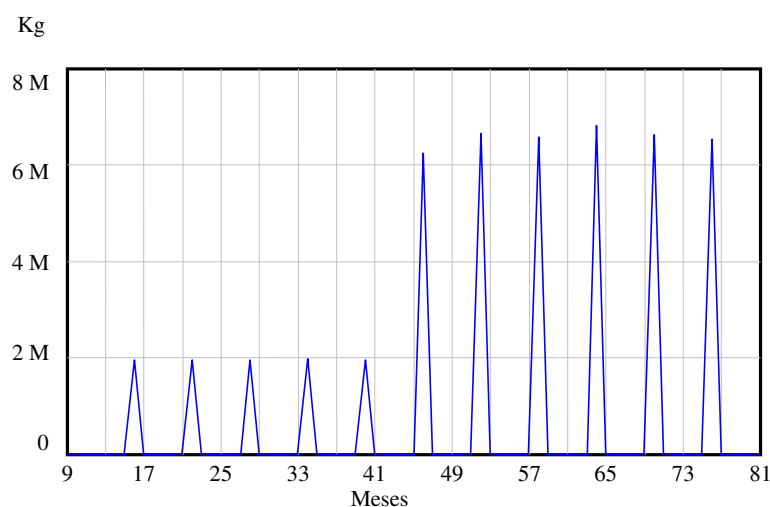
Donde:

PHaSP: Producción por Ha sin proyecto.

IPPP : Incremento promedio de producción con proyecto.

TCOP : Tierra de cultivo objetivo con proyecto.

La figura 63 muestra el volumen de producción por campaña en kilogramos (kg); se puede observar que la producción es casi estable después del mes 41 debido a que con la implementación del proyecto se garantiza el cultivo (seguridad de cultivo), esto debido al componente de obras principalmente pues al asegurar la disponibilidad hídrica se mitigan las condiciones climatológicas adversas de los andes peruanos.

**Figura 63***Volumen de producción*

## J. Subsistema mercado

El subsistema mercado hace referencia a que una vez obtenida la producción, debe reflejarse en dinero para los usuarios (utilidad); de manera que se pueda invertir más en el ámbito del proyecto, lamentablemente este subsistema tiene fluctuaciones en cuanto al precio de venta del producto y la estacionalidad del mismo. Para la formulación del modelo de mercado se ha tomado en cuenta la posible estacionalidad del y de esta manera se pueda lograr un precio de venta más alto.

Asimismo, se ha considerado la sensibilidad del mercado a posibles condiciones económicas como recesiones locales e inflación (Luquini & Nizam, 2019). Las recesiones son un factor importante pues debido a la existencia de sobre producción como ocurrió en algunos proyectos de provincias altas del Cusco donde la oferta superó ampliamente la demanda, trajo como consecuencia el fenómeno de “recesión local” y la caótica baja de precios incluso por debajo de los costos de producción lo cual desalienta el proceso productivo, con el presente modelo se puede determinar y anticiparse a estos fenómenos económicos, lo cual permite planificar anticipadamente estrategias de mercado para mitigar estos fenómenos.

El modelo de mercado es una propuesta propia pues muchos de los modelos en la bibliografía existente no consideran factores probabilísticos como el modelo de tela de araña y los parámetros que consideramos importantes para la ocurrencia de inflación o recesión (Kafka, 1997) , los parámetros utilizados se enumeran la Tabla 25.

**Tabla 22**

*Parámetros de la vista precio de venta*

<b>VARIABLES</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Unidad de Medida</b>	<b>Descripción</b>
Tasa de crecimiento mercado actual	0,15	Porcentaje	Tasa de crecimiento en que la demanda del mercado actual crece.
Tasa de crecimiento mercado potencial	0,15	Porcentaje	Tasa de crecimiento en que la demanda del mercado potencial crece (nuevos mercados).
Demanda mercado externo	1 000 000,00	Kg	Demanda posible en mercados potenciales.
Demanda mercado interno	10 000 000,00	Kg	Demanda actual de los mercados más cercanos.
Mercado actual Inicial	5 000 000,00	Kg	La demanda inicial del mercado
Precio promedio	1,10	S/.	Precio por kilogramo de papa.
Límite para recesión	1,20	porcentaje	El límite de saturación del mercado (120 %) en relación a la oferta para iniciar un proceso de recesión.
Existencias en el mercado	0,5	Und	Valor más probable de existencia del producto en el mercado (producción de la competencia).

---

Factor de Recesión	de	1,00	Porcentaje	Variable utilizada como auxiliar para los casos de análisis de sensibilidad del modelo, la misma se puede cambiar si queremos multiplicar los valores del mercado y de esta forma determinar los posibles efectos sobre el precio del producto.
--------------------	----	------	------------	---

---

La figura 64 muestra el diagrama de Forrester de Mercado, regido por las ecuaciones 3.12 y 3.13.

$$\text{Mercado Potencial}(t) = \int (LCD - MP(t)) * TCMP) dt$$

Ecuación 3.12

Donde:

LCD : límite de crecimiento de la demanda.

MP : Mercado Potencial.

TCMP: Tasa de Crecimiento Mercado Potencial.

$$\text{Mercado Actual}(t) = \int ((MP(t) - MA(t)) * TCMP) dt$$

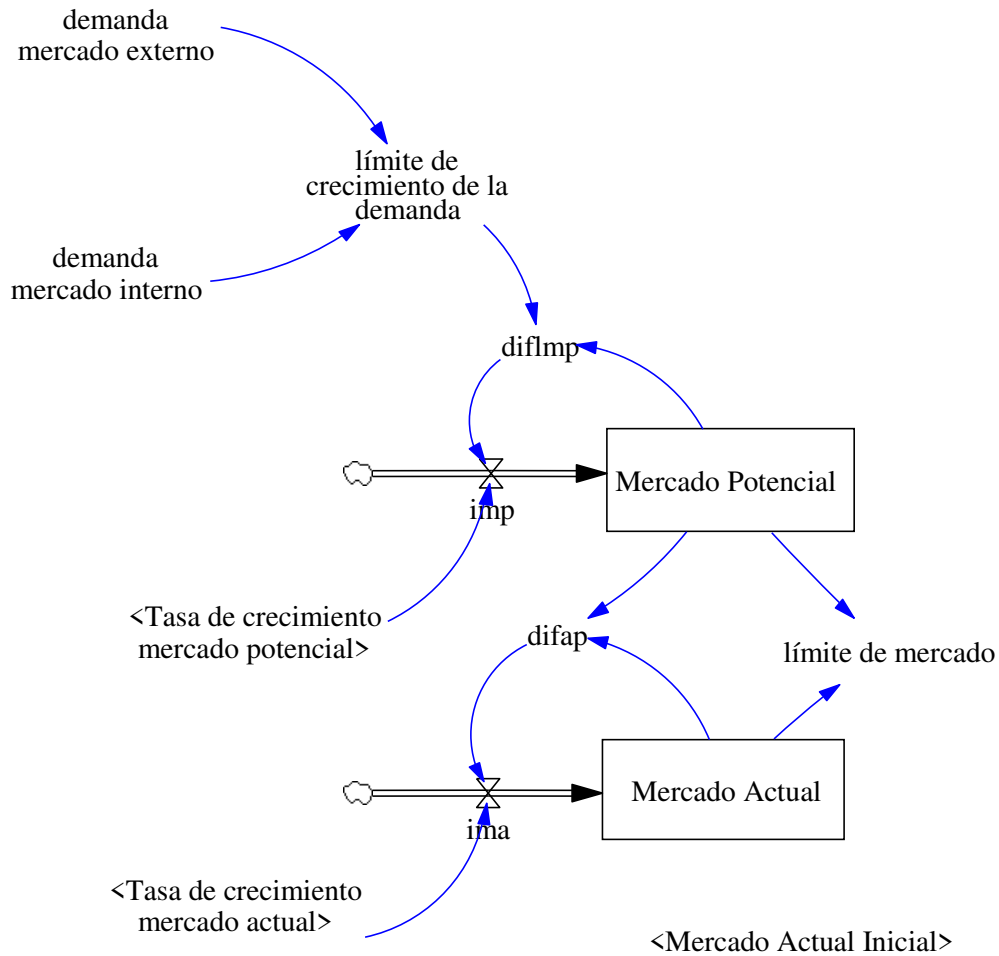
Ecuación 3.13

Donde:

MP : Mercado Potencial.

MA : Mercado Actual.

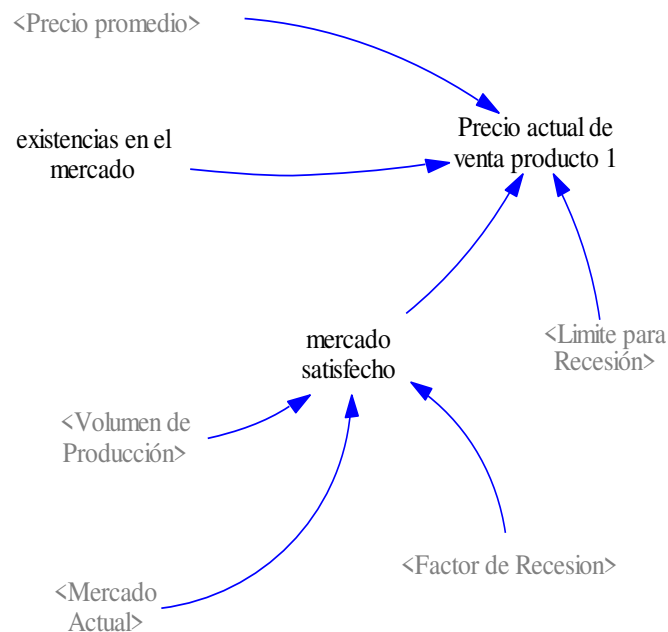
TCMP : Tasa de Crecimiento de Mercado Potencial.

**Figura 64***Diagrama de Forrester de mercado*

El modelo propuesto de precio de venta se calcula considerando las existencias en el mercado (la estacionalidad de la producción) y según el mercado satisfecho para determinar comportamiento de inflación o recesión; la interacción de las variables se muestra en Figura 65.

**Figura 65**

*Diagrama causa efecto de precio actual de venta de producto*



$$\text{Precio actual de venta producto} = \begin{cases} PP + (PP * (1 - (MS + EM))) & , \quad MS < LPR \\ ABS(PP - (EM * (1 + (MS - LPR)))) & , \quad MS \geq LPR \end{cases}$$

Ecuación N° 4.14

Donde:

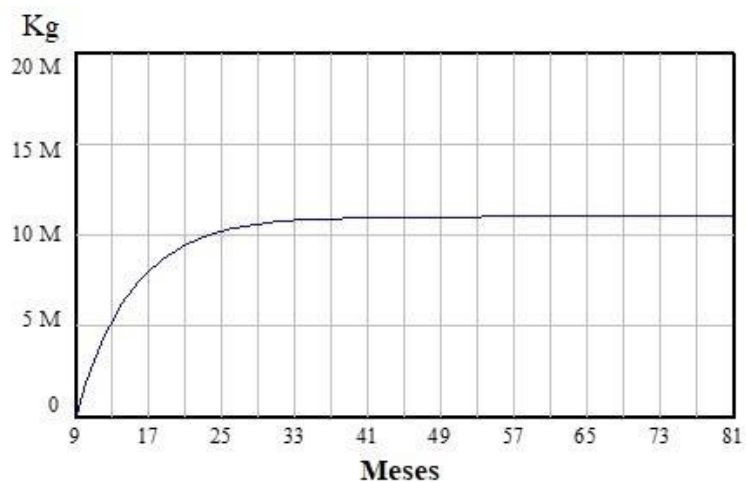
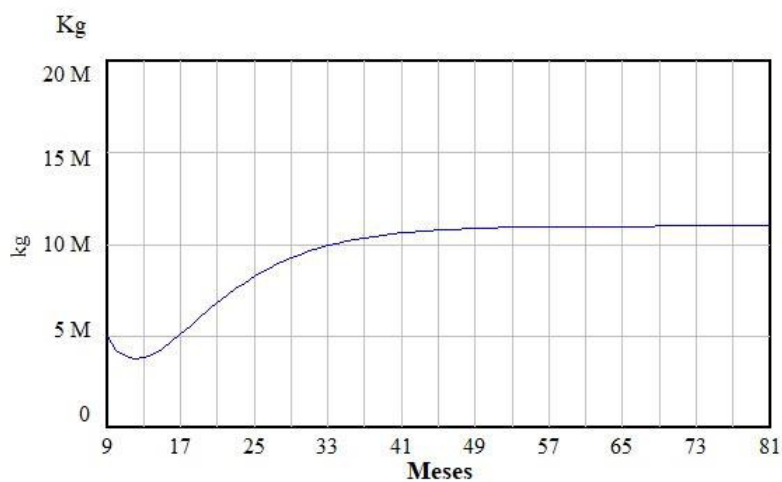
MS = Mercado Satisfecho.

LPR = Límite para Recesión.

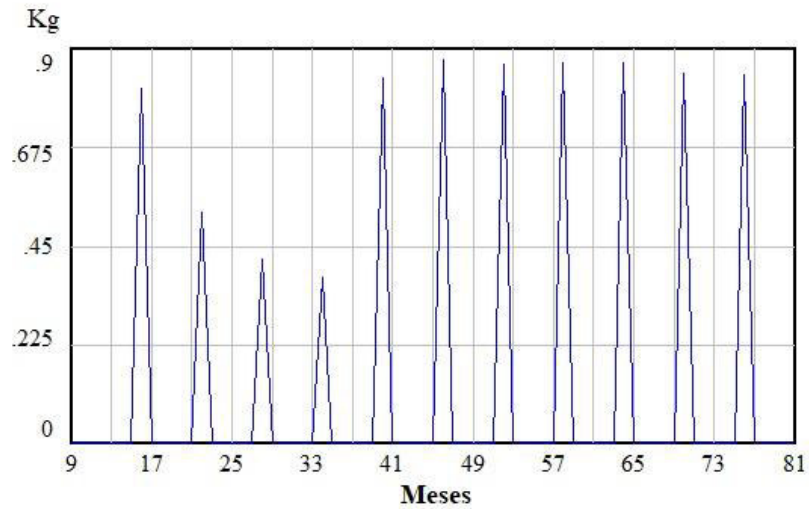
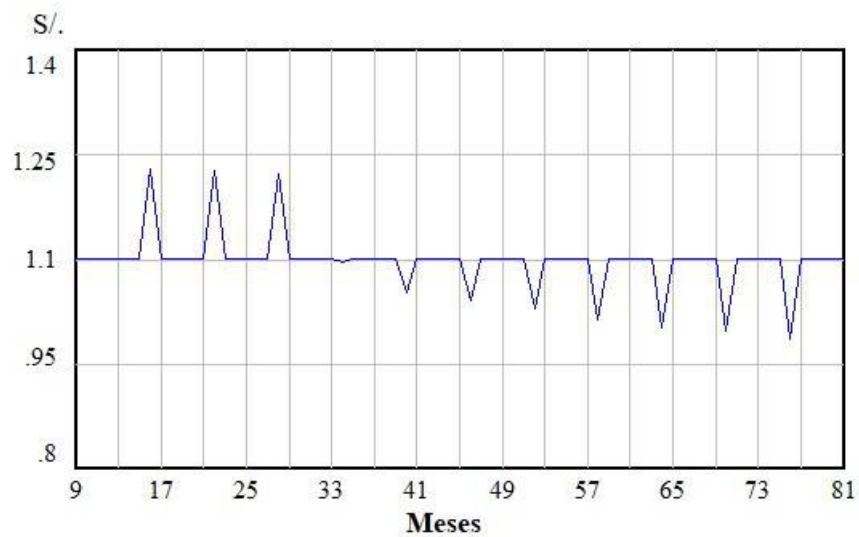
EM = Existencias en el Mercado.

PP = Precio Promedio.

Las figuras 66 y 67 muestran el comportamiento del mercado actual y del mercado potencial; es importante, que los proyectistas realicen adecuados estudios de mercado, de manera de evitar la sobreproducción de productos y por ende la generación de fenómenos de recesión.

**Figura 66***Comportamiento de mercado potencial***Figura 67***Comportamiento de mercado actual*

La figura 68 muestra el comportamiento de la variable mercado satisfecho, que se utiliza para determinar si hay muchas existencias en el mercado es decir el volumen de producción que existe en el mercado más la producción de la competencia. La figura 69 muestra el comportamiento del precio de venta del producto.

**Figura 68***Variable mercado satisfecho***Figura 69***Precio actual de venta del producto*

En la figura 69 se puede observar que el precio tiene como valor máximo de S/. 1.23 (en épocas de escasez) y como valor mínimo S/. 1.00 (en épocas de sobre producción). En la figura 70 se aprecia un ejemplo de análisis de sensibilidad que permite el modelo con la herramienta de simulación (Vensim); se construye un escenario donde la producción del

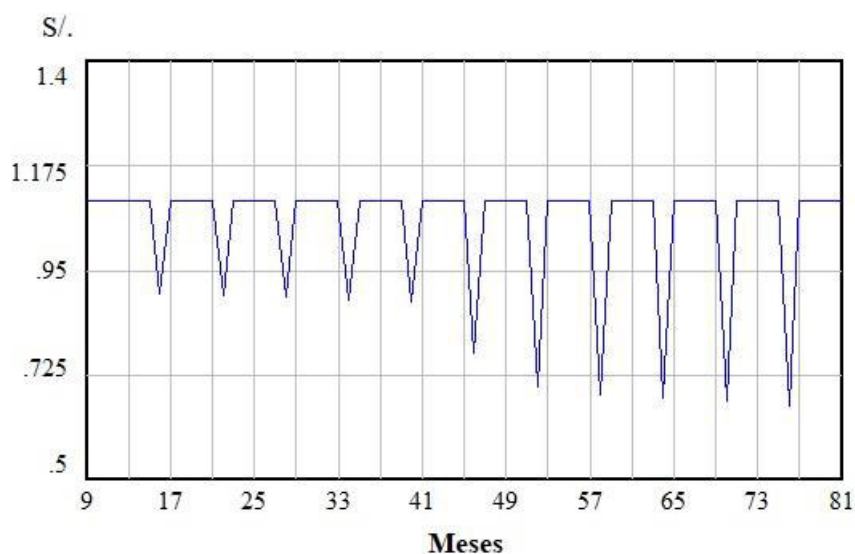
proyecto incrementa en un 30% y generamos un proceso de sobre producción (recesión) y por ende una disminución en el precio de venta hasta de S/. 0.66 x kilogramo.

El precio de la papa lamentablemente para los productores a nivel nacional ha venido disminuyendo. Peor aún se han registrado mínimos históricos lo que ha provocado conflictos sociales como son los paros agrarios. Como el ocurrido en febrero del 2018. Durante la protesta los dirigentes manifestaron que fueron afectados por la importación de papa prefrita y precocida de Holanda (Peru21, 2019).

De manera similar según la información recabada por el Ministerio de Agricultura y Riego el motivo por el cual la papa llegó a su mínimo histórico en los mercados de Lima debido a la ampliación de la frontera agrícola en el norte de Lima (Becerra Sánchez & Montero Contreras, 2017). Por tanto, es imprescindible que proyectos que incorporen terrenos agrícolas bajo riego, tengan que realizar un estudio adecuado de mercado para garantizar su sostenibilidad.

**Figura 70**

*Precio actual de venta de producto*



## K. Cálculo de utilidad

Definitivamente los precios de los productos obtenidos en el modelo anterior deben reflejarse en un ingreso monetario por el valor de la producción total y así mismo se debe verificar si se producen ingresos (utilidad) para el agricultor.

Las instituciones de cooperación nacional e internacional (ONGs, Instituciones Públicas, etc.) evalúan como un parámetro determinante la “sostenibilidad del proyecto”; este parámetro está influido por dos factores:

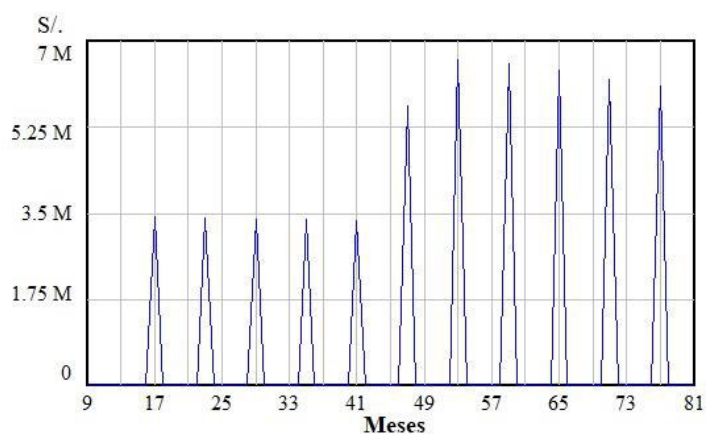
- El fortalecimiento de la organización de regantes.
- La utilidad de ingresos netos.

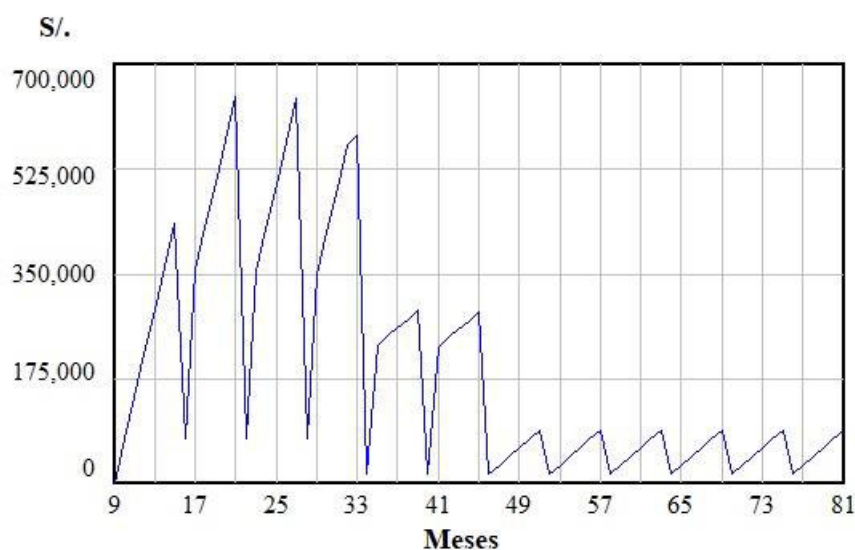
Así mismo, la utilidad que obtenga el agricultor se considera un mecanismo de retroalimentación (interacción del sistema con su entorno) para el subsistema inversión por lo que permite incrementar la inversión en insumos, maquinaria, salud, capacitación, etc. Así se genera un bucle de retroalimentación.

Las figuras 71 y 72 muestran las variables que intervienen en el sistema que se reflejan en las variables de nivel: Total Ventas por Campaña y Total Inversión por Campaña.

**Figura 71**

*Total ventas por campaña*



**Figura 72***Total inversión por campaña*

### **L. Modelo de optimización**

Los modelos propuestos en las secciones anteriores han servido para validarlos en relación a los que se aplican en la vida real, esto en contrastación con datos reales. La información que ha sido proporcionada por la oficina de Monitoreo y Programación, representada por el Mg. Eulogio Huamán.

Al respecto debemos comentar que la optimización es un término, que muchas veces conlleva el hecho de mejorar una situación real en base a nuevos métodos y/o formas de trabajo, Milan Erick al respecto comenta que muchos de los métodos sobre los cuales puedan optimizarse recaen en la mejora de los procesos de trabajo y de la voluntad de los trabajadores para hacer mejor su trabajo es decir en la aplicación de métodos de administración moderna (Milan Eric, 2016).

Sin embargo, la presente tesis está centrada en la utilización de métodos numéricos de optimización en base a los modelos matemáticos propuestos en la sección anterior (Taha, 2004).

### 1. Maximización de utilidades

De acuerdo a la literatura revisada lo que interesa principalmente para las organizaciones es contar con métodos para maximizar sus utilidades y reducir sus costos. Por lo que la función de decisión para maximizar las utilidades principalmente se basa en la utilidad, es decir ventas menos costos de producción.

$$Utilidad = Ventas - Costos de Produccion$$

La estructura de costos de producción de la papa principalmente se dividen en los rubros de mano de obra, maquinaria e insumos, los mismos que se muestran en la tabla 26.

De la tabla 26 podemos ver que la estructura de costos quedaría:

$$Costos = 11140xNrodeHas$$

y las ventas sería de:

$$Ventas = 16000xNrodeHasxPreciodeVenta$$

Para el reemplazo de las ecuaciones sea:

X1: Terreno de producción (hectáreas).

X2: Precio de venta.

X3: Mercado actual (oferta en el mercado de otros productores).

X4: Existencias en el mercado (producción de la competencia).

Por tanto la función a optimizar sería la siguiente:

$$Max Z = 160000EX_1X_2 - 11140X_1$$

Siendo:

16000: la cantidad de Kg de producción por Ha.

11140: el costo de producción por Ha (S/. 11140,00).

E: es el resultado de la ecuación tierra de cultivo adecuada que principalmente afecta a  $X_1$ , determinaría si es posible asumir dos campañas agrícolas por año, asumiremos que el valor es 1; es decir solo una campaña.

Para la estructura de las restricciones y en coherencia con el pensamiento de sistemas es necesario considerar que dentro de las restricciones del sistema se debe considerar el mercado y sus peculiaridades como son la producción de la competencia, esto se consideró para el modelamiento de precio de venta con la finalidad de poder predecir fenómenos de inflación o recesión en este caso regionales.

Por tanto las restricciones serían (se asumen los valores por mil, esto para simplificar los cálculos):

$$\text{Max } Z = 16X_1X_2 - 11,14X_1$$

Sujeto a:

$$X_3 \leq 3600 + 16X_1 \quad ; \text{ Existencias en el mercado } \dots (a)$$

$$X_3 - 16X_1 \leq 3600$$

$$X_2 \leq PP + PP * [1 - 16^{X_1}/X_3 + X_4] \quad ; \text{ Precio actual de venta } \dots (b)$$

Reemplazando y despejando (2):

Siendo PP = S/. 1,10 (Precio promedio en Nuevos Soles)

$$X_2 \leq 2,2 - 17,6^{X_1}/X_3 + 1,1 X_4$$

$$X_1 \leq 400 \quad ; \text{ Área cultivable del proyecto}$$

$$X_4 = 0,1 \quad ; \text{ Existencias en el mercado}$$

Por tanto, tenemos un sistema de programación no lineal, que se resolverá por el método de Lagrange y que debe cumplir con las condiciones de Kuhn Tucker (Eppen et al., 2000). El “lagrangiano” a optimizar es el siguiente:

$$L = 16X_1X_2 - 11.14X_1 + L(3600 - X_3 + 16X_1) + A(2,2 - X_2 - 17,6X_1/X_3 + 1,1X_4) + B(400 - X_1) + Y(0,1 - X_4)$$

Derivando L en relación a cada variable e igualando a cero tenemos:

$$L_{x_1} = 16X_2 - 11.14 + 16L - 17,6A/X_3 - B = 0 \quad \dots(1)$$

$$L_{x_2} = 16X_1 - A = 0 \quad \dots(2)$$

$$L_{x_3} = -L + 17,6X_1/X_3^2 A = 0 \quad \dots(3)$$

$$L_{x_4} = 1,1A - Y = 0 \quad \dots(4)$$

$$L_L = 3600 - X_3 + 16X_1 = 0 \quad \dots(5)$$

$$L_A = 2,2 - X_2 - 17,6X_1/X_3 + 1,1X_4 = 0 \quad \dots(6)$$

$$L_B = 400 - X_1 = 0 \rightarrow X_1 = 400 \quad \dots(7)$$

$$L_Y = 0,1 - X_4 = 0 \rightarrow X_4 = 0,1 \quad \dots(8)$$

Reemplazando (7) en (2)

$$16(400) - A = 0 \rightarrow A = 6400$$

Reemplazando en (5)

$$3600 - X_3 + 16(400) = 0 \rightarrow X_3 = 10000$$

Reemplazando en (3)

$$-L + \frac{17,6(400)(6400)}{10000^2} = 0 \rightarrow L = 0,45$$

Reemplazando en (6)

$$2,2 - X_2 - 17,6\left(\frac{400}{10000}\right) + 1,1(0,1) = 0 \rightarrow X_2 = 1,6$$

Reemplazando en (4)

$$1,1(6400) - Y = 0 \rightarrow Y = 7040$$

Reemplazando en (1)

$$16(1,6) - 11,14 + 16(0,45) - \frac{17,6(400)}{10000} - B = 0 \rightarrow B = 20,956$$

Dado que:  $L, A, B, Y \geq 0$ ; cumplen la condición de Khun Tucker, con lo que demostramos que hemos encontrado un máximo, reemplazando los valores en la función objetivo tenemos:

$$\text{Max } Z = 16(400)(1,6) - 11,14(400) = 5\,784\,000,00$$

Entonces la utilidad máxima (expresada en nuevos soles) se produce cuando el precio de venta es S/. 1,6.

## 2. Punto de equilibrio

El análisis de punto de equilibrio involucra los montos mínimos de producción que se deben llegar para garantizar que no existan pérdidas, también se puede interpretar que los ingresos totales son iguales a los costos, por lo general, se usa el análisis de punto de equilibrio para determinar la posible rentabilidad de vender determinado producto. Si del análisis se determina que los valores a alcanzar serán por debajo entonces estaremos en pérdidas. Por lo que, en base a este análisis también podremos realizar análisis de sensibilidad respectivo.

Para el análisis de punto de equilibrio se tendría:

$$Z = 16X_1X_2 - 11,14X_1$$

Sujeto a:

$$X_3 \leq 3600 + 16X_1 \quad ; \text{ Demanda}$$

$$16X_1 X_2 \geq 11,14X_1 \rightarrow 16X_2 \geq 11,14 \quad ; \text{ Ingresos igual a costos}$$

$$X_1 \geq 83,3 \quad ; \text{ Área de cultivo}$$

Resolviendo:

$$L = 16X_1X_2 - 11.14X_1 + L(16X_2 - 11.14) + A(3600 - X_3 + 16X_1) + B(X_1 - 83.3)$$

$$L_{x_1} = 16X_2 - 11.14 + B = 0 \rightarrow B = 0 \quad \dots(1)$$

$$L_{x_2} = 16X_1 - 16L = 0 \rightarrow L = -83.3 \quad \dots(2)$$

$$L_{x_3} = -A = 0 \quad \dots(3)$$

$$L_L = 16X_2 - 11.14 = 0 \rightarrow X_2 = 0.696 \quad \dots(4)$$

$$L_A = 3600 - X_3 + 16X_1 = 0 \rightarrow 3600 - X_3 + 16(83.3) \rightarrow X_3 = 2267.2 \quad \dots(5)$$

$$L_B = X_1 - 83.3 = 0 \rightarrow X_1 = 83.3 \quad \dots(6)$$

Reemplazando en Z:

$$Z = 16(83.3)(0.696) - 11.14(83.3) = 0$$

Por tanto, los ingresos han igualado a los costos, para que ocurra esto debemos destacar: El precio debe ser de S/. 0.696, la demanda en el mercado (X3) 2 267 200 (Kg), esto en un área mínima de cultivo de 83.3 Ha.

### 3. Minimización de costos

Sobre las funciones de producción existen teorías sobre los costos, ingresos, etc. y su influencia sobre la producción. En la presente sección se analiza los costos desde un punto de vista de su estructuración en base a los insumos que intervienen en el proceso de producción y hacemos hincapié en la mano de obra, estos últimos costos en la economía andina pueden ser considerados como el ayni (Alberti Giorgio, 1974), antigua tradición andina que se entiende como la colaboración mutua o reciprocidad entre familias de la misma comunidad, costumbre que se mantiene con la finalidad de minimizar costos sobre todos los de mano de obra, con lo que se podría explicar la sobre oferta de trabajo en países subdesarrollados (Kafka, 1997). Para el caso particular de producción de papas, se ha tomado en cuenta, la estructura de costos proporcionada por el Ministerio de Agricultura la misma que se resume en la siguiente tabla.

Tabla 23

Estructuras de costos directos para la producción de papa

<b>A. Costos directos</b>	<b>Variable</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo S/.</b>	<b>Sub total S/.</b>
<b>1. Mano de obra</b>	X1		138	30	3595
<b>a. Preparación del terreno y limpieza</b>					
<b>Riego de machacho y limpieza</b>		Jornal	2	30	60
<b>1.1. Siembra o transplante</b>					
<b>Desinfección de semilla</b>		Jornal	2	30	60
<b>Siembra</b>		Jornal	8	30	240
<b>Flete de insumo</b>		Flete	1	50	50
<b>1.2. Labores culturales</b>					
<b>Primer aporque(herbicida sencor)</b>		Jornal	4	30	120
<b>Segundo abonamiento (45 días)</b>		Jornal	3	30	90
<b>Control fitosanitario</b>		Jornal	2	30	60
<b>Riegos</b>		Jornal	10	30	300
<b>1.3 Cosecha</b>					
<b>Cote follaje</b>		Jornal	4	30	120
<b>Recojo tubérculos</b>		Jornal	10	30	300
<b>Guardiania</b>		Jornal	30	25	750
<b>Estibadores</b>		Jornal	48	15	720
<b>Juntadores</b>		Jornal	15	15	225
<b>Sacos – Pita 400</b>		Und	103	1	103
<b>2. Maquinaria e instrumentos agrícolas</b>					
<b>2.1 Preparación de terreno</b>					
<b>Disco, grada, surcado</b>	X3	Hrs/Maq	2	65	130
<b>2.13. Siembra</b>	X4				
<b>Tapado de semilla (tractor)</b>		Hrs/Maq	1	45	45
<b>Tapado de semilla(asemila)</b>		Hrs/Maq	1	45	45
<b>2.14. Cosecha</b>					
<b>Sacada a Máquina</b>	X5	Hrs/Maq	1	65	65
<b>Maquinaria</b>	X6	Hrs/Maq	3	65	195

<b>Herramientas</b>	<b>manuales</b>	X7	2%Maq	77.4	1	77.4
<b>(lampas, limas, etc.)</b>						
<b>Jabas,</b>	<b>canastas,</b>	<b>costales,</b>	Sacos	60	1	60
<b>fanegas, etc.</b>						
<b>3.</b>	<b>Insumos</b>					
<b>3.12.</b>	<b>Semillas</b>	X8	Kilo	2500	0.7	1750
<b>3.13.</b>	<b>Fertilizantes</b>	X9		1800	2.272	
<b>Urea</b>			Saco(50Kg)	400	2	800
<b>Sulfato de potasio</b>			Saco(50Kg)	300	2.6	780
<b>Fosfato de amonio</b>			Saco(50Kg)	500	4	2000
<b>Cloruro de potasio</b>			Saco(50Kg)	200	2.3	460
<b>Guano de isla</b>			Saco(50Kg)	400	0.46	184
<b>3.14.</b>	<b>Agroquímicos</b>	X10				
<b>Herbicidas</b>						
<b>Sencor a los 25 días</b>			1/4Lt	0.25	160	40
<b>3.15.</b>	<b>Insecticidas</b>					
<b>Cipermex</b>		X11	Lt	2	75	150
<b>Methamidophos</b>		X12	Lt	8	35	280
<b>3.16.</b>	<b>Fungicidas</b>					
<b>Dithane</b>		X13	Kg	2	25	50
<b>Folicur</b>		X14	Lt	1	235	235
<b>3.17.</b>	<b>Abono foliar</b>					
<b>Nifrofoska</b>		X15	Lt	1	15	15
<b>3.18.</b>	<b>Adherente</b>					
<b>BB5</b>		X16	Lt	1	25	25
<b>Superwett</b>		X7	Lt	1	35	35
<b>4.</b>	<b>Agua</b>	X18	M3	12350	0.01	123.5
<b>Total Costos Directos</b>						<b>11140.00</b>

Para la construcción del modelo de minimización de costos, las horas máquina e insumos es poco flexible para prescindir de estos; por tanto, la combinación de la cantidad de la mano de obra y el costo de esta, será principalmente el objetivo a hallar para ver la forma de minimizar los costos de producción.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & X_1X_2 + 65X_3 + 45X_4 + 65X_5 + 65X_6 + X_7 + 0.7X_8 + 2.27X_9 + 160X_{10} + 75X_{11} \\ & + 35X_{12} + 25X_{13} + 234X_{14} + 15X_{15} + 25X_{16} + 35X_{17} + 0.01X_{18} \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$X_1X_2 + 65X_3 + 45X_4 + 65X_5 + 65X_6 + X_7 + 0.7X_8 + 2.27X_9 + 160X_{10} + 75X_{11} + 35X_{12} + 25X_{13} + 234X_{14} + 15X_{15} + 25X_{16} + 35X_{17} + 0.01X_{18} \leq 11140; \text{ costos}$$

$$X_1 = 100 + X_{19} \quad ; \text{ jornadas}$$

$$X_2 = 10 + \frac{X_1}{X_{19}} \quad ; \text{ costo por jornada}$$

$$X_1 \geq 110; X_3 = 1; X_4 = 1; X_5 = 1; X_6 \geq 3; X_7 \geq 40; X_8 \geq 2400; X_9 \geq 1700;$$

$$X_{10} = 0.25; X_{11} = 2; X_{12} = 8; X_{13} = 2; X_{14} = 1; X_{15} = 1; X_{16} = 1; X_{17} = 1$$

Resolviendo:

$$\begin{aligned} L = & X_1X_2 + 65X_3 + 45X_4 + 65X_5 + 65X_6 + X_7 + 0.7X_8 + 2.27X_9 + 160X_{10} + 75X_{11} \\ & + 35X_{12} + 25X_{13} + 234X_{14} + 15X_{15} + 25X_{16} + 37X_{17} + 0.01X_{18} \\ & + L(11140 - X_1X_2 - 65X_3 - 45X_4 - 65X_5 - 65X_6 - X_7 - 0.7X_8 - 2.27X_9 \\ & - 160X_{10} + 75X_{11} - 35X_{12} - 25X_{13} - 234X_{14} - 15X_{15} - 25X_{16} - 37X_{17} \\ & - 0.01X_{18}) + A(100 - X_1 + X_{19}) + B\left(10 - X_2 + \frac{X_1}{X_{19}}\right) + Y(X_1 - 110) \\ & + s(1 - X_3) + E(1 - X_4) + Z(1 - X_5) + n(X_6 - 3) + O(X_7 - 40) \\ & + i(x_8 - 2400) + k(x_9 - 1700) + u(0.25 - X_{10}) + Y(2 - X_{11}) + O1(8 - X_{12}) \\ & + Pi(2 - X_{13}) + P(1 - X_{14}) + T(1 - X_{15}) + O2(1 - X_{16}) + W(1 - X_{17}) \end{aligned}$$

$$L_{x1} = X_2 - LX_2 - A + \frac{B}{X_{19}} + \gamma = 0 \rightarrow -A + \frac{0}{X_{19}} + 0 \rightarrow A = 0 \quad \dots(1)$$

$$L_{x2} = X_1 - LX_1 - B = 0 \rightarrow B = 0 \quad \dots(2)$$

$$L_{x3} = 65 - 65L - s = 0 \rightarrow s = 0 \quad \dots(3)$$

$$L_{x4} = 45 - 45L - e = 0 \rightarrow e = 0 \quad \dots(4)$$

$$L_{x5} = 65 - 65L - z = 0 \rightarrow z = 0 \quad \dots(5)$$

$$L_{x6} = 65 - 65L + n = 0 \rightarrow n = 0 \quad \dots(6)$$

$$L_{x7} = 1 - L + O = 0 \rightarrow O = 0 \quad \dots(7)$$

$$L_{x8} = 0.7 - 0.7L + i = 0 \rightarrow i = 0 \quad \dots(8)$$

$$L_{x9} = 2.27 - 2.27L + k = 0 \rightarrow k = 0 \quad \dots(9)$$

$$L_{x10} = 160 - 160L - u = 0 \rightarrow u = 0 \quad \dots(10)$$

$$L_{x11} = 75 - 75L - Y = 0 \rightarrow Y = 0 \quad \dots(11)$$

$$L_{x12} = 35 - 35L - O1 = 0 \rightarrow O1 = 0 \quad \dots(12)$$

$$L_{x13} = 25 - 25L - Pi = 0 \rightarrow Pi = 0 \quad \dots(13)$$

$$L_{x14} = 234 - 234L - p = 0 \rightarrow p = 0 \quad \dots(14)$$

$$L_{x15} = 15 - 15L - t = 0 \rightarrow t = 0 \quad \dots(15)$$

$$L_{x16} = 25 - 25L - O2 = 0 \rightarrow O2 = 0 \quad \dots(16)$$

$$L_{x17} = 37 - 37L - w = 0 \rightarrow w = 0 \quad \dots(17)$$

$$L_{x18} = 0.01 - 0.01L = 0 \rightarrow L = 1 \quad \dots(18)$$

$$L_L = 11140 - X1X2 - 65X3 - 45X4 - 65X5 - 65X6 - X7 - 0.7X8 - 2.27X9 - 160X10 - 75X11 - 35X12 - 25X13 - 234X14 - 15X15 - 25X16 - 37X17 - 0.01X18 \quad \dots(19)$$

$$L_a = 100 - X1 + X19 = 0 \quad \dots(20)$$

$$L_b = 10 - X2 + X1/X19 = 0 \quad \dots(21)$$

$$L_y = X1 - 110 = 0 \rightarrow X1 = 110 \quad \dots(22)$$

$$L_s = 1 - X3 = 0 \rightarrow X3 = 1 \quad \dots(23)$$

$$L_e = 1 - X4 = 0 \rightarrow X4 = 1 \quad \dots(24)$$

$$L_z = 1 - X5 = 0 \rightarrow X5 = 1 \quad \dots(25)$$

$$L_n = X6 - 3 = 0 \rightarrow X6 = 3 \quad \dots(26)$$

$$L_o = X7 - 40 = 0 \rightarrow X7 = 40 \quad \dots(27)$$

$$L_i = X8 - 2400 = 0 \rightarrow X8 = 2400 \quad \dots(28)$$

$$L_k = X9 - 1700 = 0 \rightarrow X9 = 1700 \quad \dots(29)$$

$$L_u = 0.25 - X10 = 0 \rightarrow X10 = 0.25 \quad \dots(30)$$

$$L_y = 2 - X11 = 0 \rightarrow X11 = 2 \quad \dots(31)$$

$$L_{o1} = 8 - X12 = 0 \rightarrow X12 = 2 \quad \dots(32)$$

$$L_{pi} = 2 - X13 = 0 \rightarrow X13 = 2 \quad \dots(33)$$

$$L_p = 1 - X14 = 0 \rightarrow X14 = 1 \quad \dots(34)$$

$$L_t = 1 - X_{15} = 0 \rightarrow X_{15} = 1 \quad \dots(35)$$

$$L_{o2} = 1 - X_{16} = 0 \rightarrow X_{16} = 1 \quad \dots(36)$$

$$L_w = 1 - X_{17} = 0 \rightarrow X_{17} = 1 \quad \dots(37)$$

Reemplazando en (20) tenemos:  $X_{19} = 10$

Reemplazando en (21) tenemos:  $X_2 = 21$ ; costo por jornada mínimo

Reemplazando en (19) tenemos:  $X_{18} = 205\,000,00\text{ m}^3$ ; cantidad de agua requerida. Por tanto, el costo mínimo se obtiene con 110 jornadas de trabajo a S/.21,00.

#### 4. Optimización de la variable de tierra de cultivo

El análisis realizado de maximización y minimización hasta ahora ha sido realizado principalmente teniendo en cuenta sólo una campaña agrícola por temporada, el hecho de realizar infraestructura agrícola como ya se comentó principalmente tiene implicancias en asegurar el cultivo; pero, en el siguiente análisis, podríamos estudiar el comportamiento de los factores de producción (agua, insumos, capacitaciones, maquinaria y mano de obra) para poder lograr más campañas agrícolas.

En el modelo de producción propuesto, existe la variable tierra de cultivo adecuada; por tanto, sobre este modelo es el que se deben realizar el análisis de sensibilidad.

Para obtener el máximo de número de campañas sea la función:

$$\text{Max } Z = 0.6X_1/X_2 + 0.1 X_3/X_4 + 0.15X_5 + 0.1X_6 + 0.05X_7/X_6$$

Donde:

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{\text{Agua para riego disponible}}{\text{Promedio agua requerida}} = \frac{595}{178.50} \text{ m}^3$$

$$\frac{X_3}{X_4} = \frac{\text{Insumos disponibles}}{\text{Insumos requeridos}}$$

$$\frac{X_7}{X_8} = \frac{\text{Mano de obra disponible}}{\text{Mano de obra requerida}}$$

$X_5 = \text{Capacitaciones}$

$X_6 = \text{Maquinaria}$

Sujeto a:

$$X_2/X_1 \geq 1; X_4/X_3 \geq 1; X_5 \leq 4; X_6 \leq 6; X_2 \leq 595; X_4 \leq 90; X_8/X_7 \geq 1; X_7 \leq 120$$

Resolviendo:

$$L = \frac{0.6X_1}{X_2} + \frac{0.1X_3}{X_4} + 0.15X_5 + 0.1X_6 + 0.05X_7 + L\left(\frac{X_2}{X_1} - 1\right) + A\left(\frac{X_4}{X_3} - 1\right) + B(4 - X_5) \\ + Y(6 - X_6) + Pi(595 - X_2) + E(90 - X_4) + s\left(\frac{X_8}{X_7} - 1\right) + T(120 - X_7)$$

$$L_{x1} = \frac{0.6}{X_2} - \frac{LX_2}{X_1^2} = 0 \rightarrow 0.6 - L = 0 \rightarrow L = 0.6 \quad \dots(1)$$

$$L_{x2} = -\frac{0.6X_1}{X_2^2} + \frac{L}{X_1} - Pi = 0 \rightarrow Pi = 0.6 \quad \dots(2)$$

$$L_{x3} = \frac{0.1}{X_4} - \frac{aX_4}{X_3^2} = 0 \rightarrow a = 0.1 \quad \dots(3)$$

$$L_{x4} = \frac{-0.1X_3}{X_4^2} + \frac{a}{X_3} - E = 0 \rightarrow E = 0 \quad \dots(4)$$

$$L_{x5} = 0.15 - B = 0 \rightarrow B = 0.15 \quad \dots(5)$$

$$L_{x6} = 0.1 - Y = 0 \rightarrow Y = 0.1 \quad \dots(6)$$

$$L_{x7} = 0.05 - \frac{sX_8}{X_7^2} - T = 0 \rightarrow T = 0.05 \quad \dots(7)$$

$$L_{x8} = \frac{s}{X_7} = 0 \quad \dots(8)$$

$$L_L = \frac{X_2}{X_1} - 1 = 0 \rightarrow X_2 = X_1 = 595 \quad \dots(9)$$

$$L_a = \frac{X_4}{X_3} - 1 = 0 \rightarrow X_4 = X_3 = 90 \quad \dots(10)$$

$$L_B = 4 - X_5 = 0 \rightarrow X_5 = 4 \quad \dots(11)$$

$$L_Y = 6 - X_6 = 0 \rightarrow X_6 = 6 \quad \dots(12)$$

$$L_{Pi} = 595 - X_2 = 0 \rightarrow X_2 = 595 \quad \dots(13)$$

$$L_E = 90 - X_4 = 0 \rightarrow X_4 = 90 \quad \dots(14)$$

$$L_O = \frac{X_8}{X_7} - 1 = 0 \rightarrow X_8 = X_7 = 120 \quad \dots(15)$$

$$L_T = 120 - X_7 = 0 \rightarrow X_7 = 120 \quad \dots(16)$$

Como se puede apreciar se cumplen las condiciones de Kuhn Tucker, entonces reemplazando en Z:

$$Z = 0.6(1) + 0.1(1) + 0.15(4) + 0.1(6) + 0.05(1) = 1.95 \quad (02 \text{ campañas agrícolas})$$

De la misma manera podemos definir las restricciones para conocer bajo qué condiciones se puede obtener el mínimo para la variable “tierra de cultivo adecuada”.

$$\text{Min } Z = 0.6X_1/X_2 + 0.1 X_3/X_4 + 0.15X_5 + 0.1X_6 + 0.05X_7/X_6$$

Sujeto a:

$$X_2/X_1 \geq 0.5; X_4/X_3 \geq 0.5; X_5 \geq 1; X_6 \geq 0; X_4 \leq 40; X_2 \leq 90; X_8/X_7 \geq 0.5; X_7 \leq 120$$

Resolviendo:

$$\begin{aligned} L = & \frac{0.6X_1}{X_2} + \frac{0.1X_3}{X_4} + 0.15X_5 + 0.1X_6 + 0.05X_7/X_8 + L \left( \frac{X_2}{X_1} - 0.5 \right) + a \left( \frac{X_4}{X_3} - 0.5 \right) \\ & + B(40 - X_4) + Y(90 - X_2) + E(X_5 - 1) + PiX_6 + T \left( \frac{X_8}{X_7} - 0.5 \right) \\ & + O(120 - X_7) \end{aligned}$$

$$L_{x1} = \frac{0.6}{X_2} - \frac{LX_2}{X_1^2} = 0 \rightarrow \frac{0.6}{X_2} - \frac{LX_2}{(0.5X_2)^2} = \frac{0.6}{X_2} - 4L/X_2 \rightarrow L = 0.15 \quad \dots(1)$$

$$L_{x2} = -\frac{0.6X_1}{X_2^2} + \frac{L}{X_1} - Y = 0 \rightarrow -\frac{0.6X_1}{(0.5X_2)^2} + \frac{0.15}{X_1} - Y = -2.4 + 0.15 - 45Y \rightarrow Y = 0.53 \quad \dots(2)$$

$$L_{x3} = \frac{0.1}{X_4} - \frac{aX_4}{X_3^2} = 0 \rightarrow \frac{0.1}{X_4} - \frac{aX_4}{(0.5X_4)^2} = 0.1 - 4a = 0 \rightarrow a = 0.025 \quad \dots(3)$$

$$\begin{aligned} L_{x4} &= \frac{-0.1X_3}{X_4^2} + \frac{a}{X_3} - B = 0 \\ \rightarrow & \frac{-0.1X_3}{(0.5X_3)^2} + \frac{0.025}{X_3} - B \rightarrow -0.4 + 0.025 - 20B \rightarrow B = 0.01875 \quad \dots(4) \end{aligned}$$

$$L_{x5} = 0.15 + E = 0 \rightarrow E = -0.15 \quad \dots(5)$$

$$L_{x6} = 0.1 + Pi = 0 \rightarrow Pi = -0.1 \quad \dots(6)$$

$$\begin{aligned} L_{x7} &= \frac{0.05}{X_8} - \frac{TX_8}{X_7^2} - O = 0 \rightarrow \frac{0.05}{X_8} - \frac{0.2X_8}{(0.5X_8)^2} - O = 0.05 - 0.8 - 60O \rightarrow O = -0.0125 \\ & \dots(7) \end{aligned}$$

$$L_{x8} = -\frac{0.05X7}{X8^2} + \frac{T}{X7} = 0 \rightarrow -\frac{0.05X7}{(0.5X7)^2} + \frac{T}{X7} = -0.2 + T = 0 \rightarrow T = 0.2 \quad \dots(8)$$

$$L_L = \frac{X2}{X1} - 0.5 = 0 \rightarrow X2 = 0.5X1 \quad \dots(9)$$

$$L_A = X4/X3 - 0.5 = 0 \rightarrow X4 = 0.5X3 \quad \dots(10)$$

$$L_B = 40 - X4 = 0 \rightarrow X4 = 40 \quad \dots(11)$$

$$L_Y = 90 - X2 = 0 \rightarrow X2 = 90 \quad \dots(12)$$

$$L_E = X5 - 1 = 0 \rightarrow X5 = 1 \quad \dots(13)$$

$$L_{PI} = X6 = 0 \quad \dots(14)$$

$$L_T = \frac{X8}{X7} - 0.5 = 0 \rightarrow X8 = 0.5X7 \rightarrow X8 = 60 \quad \dots(15)$$

$$L_O = 120 - X7 = 0 \rightarrow X7 = 120 \quad \dots(16)$$

Reemplazando en Z:

$$Z = 0.6(0.5) + 0.1(0.5) + 0.15(1) + 0.1(0) + 0.05(0.5) = 0.595$$

Lo que equivaldría a media campaña agrícola.

Otro dato importante del análisis de esta función sería que  $X1 = 180 \text{ m}^3$ , es decir para garantizar una cosecha mínima se requeriría de un caudal de agua de  $180 \text{ m}^3$ . Dato por demás importante para los planificadores y diseñadores de infraestructura de riego.

### **M. Análisis de óptimos utilizando algoritmos genéticos**

Los algoritmos genéticos son un tipo de algoritmo utilizado en inteligencia artificial utilizados principalmente en optimización de funciones, los algoritmos genéticos están basados en las teorías de Charles Darwin sobre la evolución biológica y selección natural, en la cual individuos mejor adaptados mejor adaptados generan mayor descendencia (Darwin, 1859).

Goldberg define los algoritmos genéticos de la siguiente manera: “Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsquedas basados en la mecánica de selección natural y de la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de secuencias con un intercambio de información estructurado, aunque aleatorizado, para constituir así un algoritmo de búsqueda que tenga algo de las generalidades de las búsquedas humanas” (Goldberg D. , 1989, 24).

### 1. Procedimiento de algoritmos genéticos

Al conjunto de características que se representan por un cromosoma se le denomina genotipo. El genotipo es la información genética del ADN de un individuo y el individuo en si sería en fenotipo. La codificación de los individuos se hace mediante valores binarios. Cada bit perteneciente a un gen recibe el nombre de alelo (Gestal Pose, 2019).

### 2. Función de evaluación

También conocido como el fitness, consiste en la función que permita evaluar si las soluciones son adecuadas para el problema planteado, una vez generada una población de individuos, esta función debe permite saber cuáles son los mejores individuos generados a través del cruzamiento de dos individuos mediante operadores genéticos (Gestal Pose, 2019).

### 3. Operadores

#### 3.1. Operadores de cruzamiento

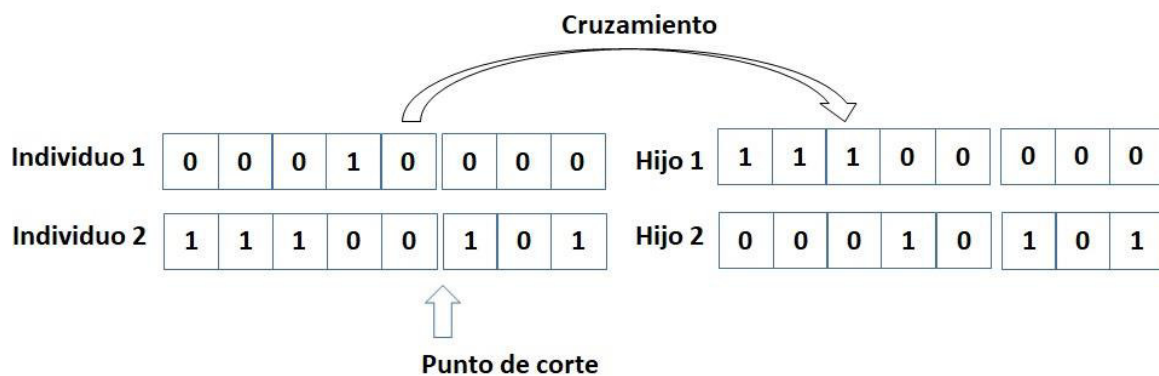
Estos operadores se utilizan para la “combinación” de individuos genéticamente mejor adaptados para la creación de su descendencia, en la que deben reflejarse las características del padre y de la madre, entre los operadores más importante tenemos:

- Cruce por un punto

El procedimiento de cruce mediante este método consiste en cortar los cromosomas de los individuos seleccionados en un determinado punto, así se genera la cabeza y la cola, luego se intercambian las cabezas, de esta forma se generan nuevos descendientes, este procedimiento se muestra en la figura 73 (Gestal Pose, 2019).

**Figura 73**

*Cruce por un punto*



- Cruce por dos puntos

Es una variación del cruce por un punto, sólo que esta vez se eligen dos puntos de cortes para generar 3 segmentos en cada individuo “padre”, posteriormente se combinan el primer y el segundo segmento de cada individuo (Gestal Pose, 2019).

- Cruce uniforme

En este cruce se selecciona una máscara de cruce con valores binarios; por ejemplo si es 1 entonces se copia del primer padre caso contrario de la segunda madre, para generar el segundo hijo se intercambia la interpretación de 1 y 0 en la máscara o el orden de los padres (Gestal Pose, 2019).

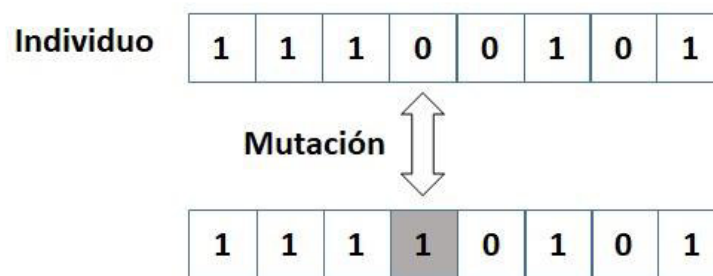
### 3.2. Operadores de mutación

Estos operadores permiten evaluar todos los genes de un individuo, por lo general sólo un gen debe variar aleatoriamente, este operador se ejecuta junto con el operador de cruce. Por

lo general los individuos después de mutados resultan en un fitness menor, por tanto, se recomienda un nivel de mutación de 1%; sin embargo, es necesario realizar la mutación para evaluar la mayor cantidad de posibilidades, los operadores más comunes son: reemplazo aleatorio y mutación para representación de orden.

**Figura 74**

*Mutación por reemplazo aleatorio*



### 3.3. Operador de selección

Los operadores de selección principalmente determinan una vez dada una determinada generación quienes son los individuos más aptos para reproducirse, además, es importante dar cierta posibilidad de reproducción a los individuos menos aptos, pues, pueden tener cierta información útil, entre los operadores más importantes tenemos:

#### - Selección por ruleta (SR)

Es uno de los métodos más utilizados en algoritmos genéticos, consiste en asignar a cada individuo una probabilidad proporcional a la ruleta (la suma de las probabilidades debe dar uno) (Beasley et al., 1993). Es de entender que los mejores individuos reciben una mayor probabilidad, el pseudocódigo es el siguiente:

```

Algoritmo Selección por ruleta
n>=0
mientras tamaño_población > n hacer
  r = aleatorio()
  calcular fitness_acumulado, fitness_total, SUM= $\sum$  fitness_proporcional
  si SUM < r
    seleccionar primer_cromosoma
  caso contrario
    seleccionar el i-ésimo cromosoma
  fin si
  n=n+1
fin mientras
return cromosomas con valor fitness proporcional al tamaño de área de la ruleta

```

- Selección por torneo (ST)

La selección por torneo se hace mediante una la comparación de individuos en un subgrupo elegidos aleatoriamente, de manera que no es necesario aplicar a toda la población, el tamaño del grupo de individuos depende el grado de convergencia, a continuación el pseudocódigo (Goldberg D. , 1989).

```

Algoritmo Selección por torneo
Definir número de concursantes
Calcular el fitness acumulado
mientras tamaño de concursantes > 0 hacer
  elige concursantes
fin mientras
ordenar los concursantes
seleccionar ganador
return cromosomas con valor fitness proporcional al tamaño de área de la ruleta

```

- Selección basada en ranking (SBR)

La población debe ser ordenada por su fitness, y según esta se asigna la probabilidad de selección, esta ordenación incrementa el tiempo de ejecución de este operador. El ranking se define por la fórmula siguiente:

$$Ranking_i = 2 - SP + (2 * (SP - 1) * \frac{Pos - 1}{n - 1})$$

Donde:

$$1 < SP \leq 2$$

n: número de individuos de la población.

Pos: posición del individuo en la población.

SP: presión de la selección.

```

Algoritmo Selección basada en ranking
n>=0
mientras tamaño_población > n hacer
  r = aleatorio()
  Ordenar población por ranking
  Asignar fitness
  calcular fitness_acumulado, fitness_total, SUM=∑ fitness_proporcional
  si SUM < r
    seleccionar primer_cromosoma
  caso contrario
    seleccionar el i-ésimo cromosoma
  fin si
n=n+1
fin mientras
return cromosomas con valor fitness

```

- Selección sexual(SS)

Este operador se basa en la selección sexual natural en la cual se opera a través de la selección femenina, la cual se basa en: a) dividir la generación en machos y hembras b) seleccionar hembra no emparejada. c) seleccionar un macho a emparejar. d) emparejar macho y hembra. e) repetir hasta que todas las hembras hayan emparejado (Goh et al., 2003).

```

Algoritmo Selección sexual
Definir población de machos y hembras según su fitness
n = tamaño de población / 2
Calcular el fitness acumulado
mientras n > 0 hacer
    seleccionar hembra no emparejada
    seleccionar macho para emparejar de acuerdo a su fitness
    n = n-1
fin mientras
return parejas formadas
  
```

Estos operadores predisponen el rendimiento de los algoritmos genéticos principalmente según la convergencia y número de generaciones creadas hasta alcanzar el óptimo global.

Jadaan compara el rendimiento de los operadores SR y SBR, con diferentes funciones matemáticas. Resultando que SBR es mejor a SR en cuanto a la cantidad de generaciones (Jadaan et al., 2005) . Zhong en sus investigaciones compara los operadores SR y ST, deduciendo que el operador ST es más eficiente (Zhong et al., 2005).

Goh en su investigación propone el operador SS y a su vez lo compara con el operador ST y determina que el operador SS tiene un mejor desempeño (Goh et al., 2003).

Por tanto, se considera a los operadores de selección genética SS y ST los más eficientes de acuerdo a la literatura citada y en base a estos se realizará las comparaciones en el rendimiento para el modelo de optimización propuesto en la presente tesis.

Los parámetros del modelo para la comparación de los algoritmos genéticos se definen por la recomendación de (Digalakis & Margaritis, 2002), y son listados a continuación:

**Tabla 24**

*Parámetros para los algoritmos genéticos*

Parámetro	Valor
Tamaño de la población	20,100,200,400
Probabilidad de cruzamiento	0.65
Probabilidad de mutación	0.08

La función de fitness se da por el siguiente pseudocódigo:

```
Function fitness (X1, X2)
return 16000*X1*X2 - 11140*X1;
```

Al ser un problema de programación no lineal con restricciones estas deben ser comparados para verificar si el fitness se cumple de acuerdo a determinadas condiciones, según la siguiente función:

```
Function condicion (X, Y)
x4, x5=0.1;
x4=3600+16*x;
if (x<=106 && y<=2.2+17.6*x/x4+1.1*x5 && x4<=3600+16*x) return true; return false;
```

Para determinar el desempeño de los operadores de selección se ha implementado ambos operadores en el lenguaje de programación C++. Se ha considerado la ejecución para 1000 generaciones, cuyos principales parámetros obtenidos pueden observarse en la tabla 28.

**Tabla 25***Comparación del desempeño de algoritmos genéticos con diferentes operadores de selección*

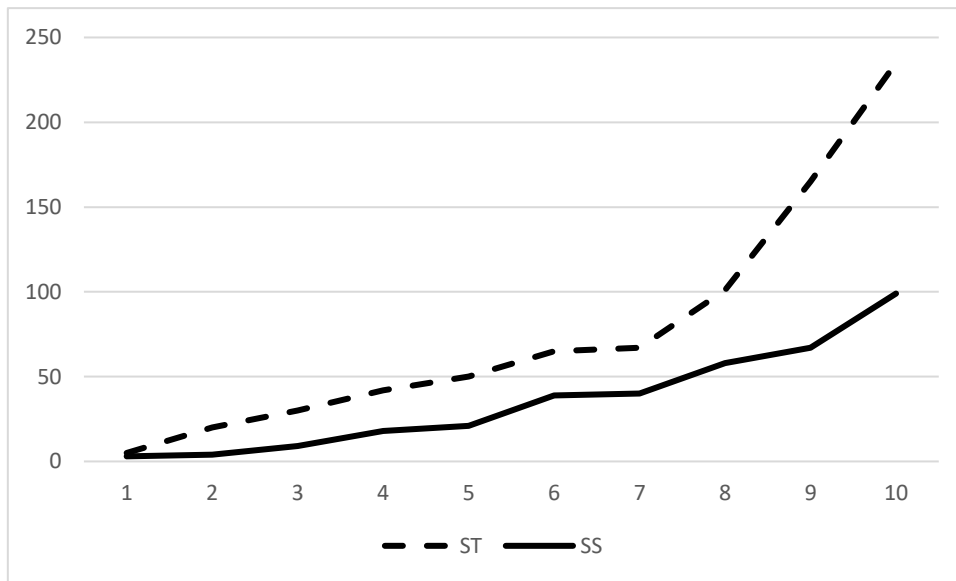
Corrida	Selección por torneo			Selección sexual		
	Primera generación en lograr el máximo global	Número de generaciones que logran el máximo global	Número de generaciones que logran un máximo	Primera generación en lograr el máximo global	Número de generaciones que logran el máximo global	Número de generaciones que logran un máximo
1	50	16	368	99	13	520
2	67	14	350	9	16	518
3	42	17	370	4	14	502
4	165	7	343	39	14	521
5	5	18	379	18	13	509
6	30	8	351	3	16	511
7	65	16	376	58	17	511
8	235	9	385	40	15	495
9	20	17	389	67	14	503
10	101	12	346	21	19	519
Mínimo	5	7	334	3	13	495
Máximo	235	18	376	99	19	521
Promedio	78	13,4	352,3	35,8	15,1	510,9

Como se puede apreciar de la tabla 28 El operador SS tiene en promedio la primera generación en lograr el máximo global la generación 35,8 mientras que el operador ST la generación 78, es decir que el operador SS es 45,89% más eficiente. En cuanto al total de generaciones que logran un máximo global tenemos que el operador SS tiene en promedio 15,1 generaciones mientras que el operador ST 13,4 generaciones; por tanto, el operador SS es 0,12% más eficiente. El último parámetro que se considera importante es la cantidad de generaciones que logran un máximo. El operador SS lograr en promedio 510,9 generaciones mientras que el operador ST lograr 325,3 es decir un 71,57% más generaciones; por tanto, se podría afirmar que el operador SS permite un mayor grado de aprendizaje.

De la revisión de los antecedentes entonces se confirma que el operador SS es más eficiente que el ST en este caso para un modelo no lineal con restricciones. En las figuras 75, 76 y 77 también se puede observar la comparación de ambos operadores de selección.

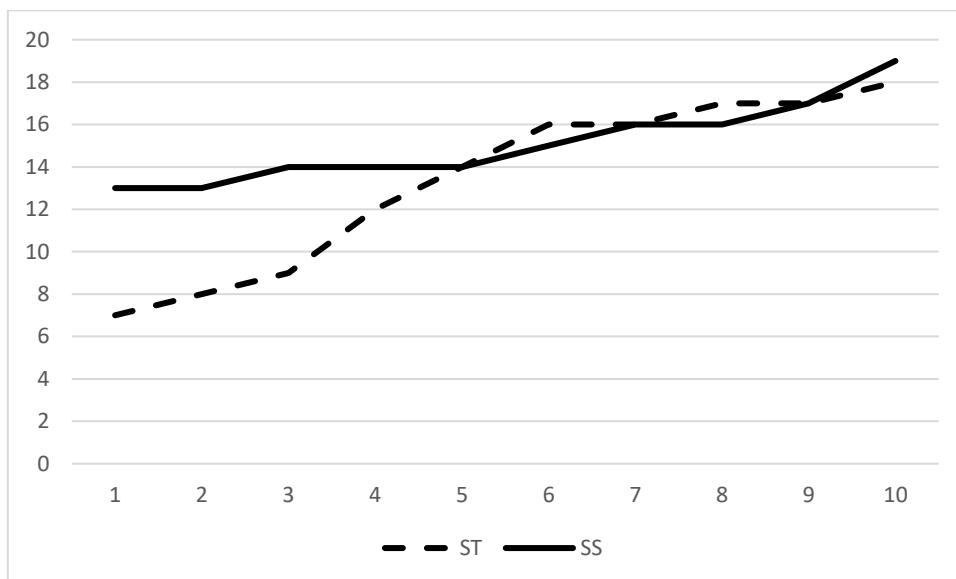
**Figura 75**

*Primera generación en lograr el máximo global*



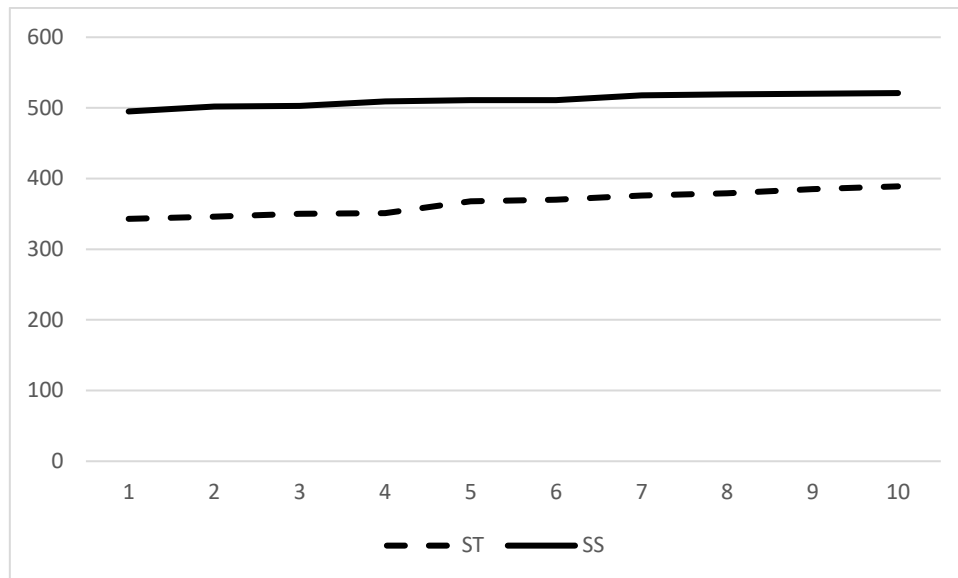
**Figura 76**

*Número de generaciones que logran el máximo global*



**Figura 77**

*Número de generaciones que logran un máximo*



### 3.6. Análisis de datos

#### 3.6.1. Validez y fiabilidad de los instrumentos

Los instrumentos están orientados para la validación del modelo de simulación y una vez validados estos posteriormente plantear el modelo de optimización. Por lo que para validar un modelo de simulación se toma en cuenta la coherencia de los datos reales versus los datos simulados, para la validación de modelos se utiliza la función normal.

La información histórica ha sido proporcionada por el Mg. Eulogio Huamán Mamani ex responsable de la Oficina de Programación y Monitoreo y ex Director de Gestión de Conocimiento del PEPMI, datos que han sido recolectados de proyectos ejecutados en la provincia de Anta.

En cuanto al modelo de optimización para determinar los óptimos globales, estos deben cumplir con las condiciones de Khun Tucker.

## A. Fichas de observación para determinar la validación del modelo de optimización

## 1. Información histórica del subsistema “capacitación”

**Tabla 26***Información histórica subsistema capacitación*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que finalizan las capacitaciones (meses)</b>
<b>Pampaconga</b>	42
<b>Limatambo</b>	52
<b>Llaspay</b>	38
<b>Urubamba</b>	48
<b>Salcca</b>	54

## - Valores y parámetros de simulación

Objetivo: Total de capacitaciones en el proyecto = 90 capacitaciones

Capacitaciones programadas por mes = 4 capacitaciones

Resultado de la simulación = 45 meses

## 2. Información histórica del subsistema organización

## - Fortalecimiento de la organización

**Tabla 27***Información histórica fortalecimiento de la organización*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra el fortalecimiento de la organización al 100% (meses)</b>
<b>Pampaconga</b>	24
<b>Limatambo</b>	18
<b>Llaspay</b>	18

<b>Urubamba</b>	25
<b>Salcca</b>	28

Valores y parámetros de simulación

Objetivo: Total de capacitaciones en el proyecto	= 1 (100%)
Fortalecimiento de organización sin proyecto	= 0.15 (15,0 %)
Tasa de aporte fortalecimiento de organización por Capacitación	=0.065 (65%)
Resultado de la simulación	= 25 meses

- Administración del agua

**Tabla 28**

*Información histórica administración del agua*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra la administración del agua en 100 % (meses)</b>
<b>Pampaconga</b>	26
<b>Limatambo</b>	28
<b>Llaspay</b>	18
<b>Urubamba</b>	28
<b>Salcca</b>	30

Valores y parámetros de simulación:

Objetivo: Total de administración del agua en el proyecto	= 1 (100%)
Administración del agua sin proyecto	= 0.15 (15 %)
Tasa de Aporte Administración del agua por capacitación	= 0.065(6.5%)
Resultado de la simulación	= 25 meses

- Técnicas de riego

**Tabla 29**

*Información histórica aplicación de técnicas de riego*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra la aplicación de técnicas de riego al 100% (meses)</b>
<b>Pampaconga</b>	30
<b>Limatambo</b>	28
<b>Llaspay</b>	24
<b>Urubamba</b>	26
<b>Salcca</b>	32

Valores y parámetros de simulación:

Objetivo: Total eficiencia de aplicación de técnicas de riego = 1 (100%)

Eficiencia Aplicación técnicas de riego sin proyecto = 0.05 (5 %)

Tasa de aporte técnicas de riego por capacitación = 0.06 (6%)

Resultado de la simulación = 29 meses

- Técnicas de cultivo

**Tabla 30**

*Información histórica aplicación técnicas de cultivo*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra el objetivo al 100% (meses)</b>
<b>Pampaconga</b>	24
<b>Limatambo</b>	30
<b>Llaspay</b>	24
<b>Urubamba</b>	30

<b>Salcca</b>	30
---------------	----

Valores y parámetros de simulación:

Objetivo: Total Eficiencia de aplicación de técnicas de cultivo = 1 (100%)

Eficiencia Aplicación técnicas de cultivo sin proyecto = 0.2(20%)

Tasa de Aporte técnicas de cultivo por capacitación = 0.07(7%)

Resultado de la simulación = 27 meses

### 3. Información histórica del subsistema obras

**Tabla 31**

*Información histórica tiempo para culminar obras*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra el culminar las obras 100% (meses)</b>
<b>Pampaconga</b>	30
<b>Limatambo</b>	28
<b>Llaspay</b>	24
<b>Urubamba</b>	36
<b>Salcca</b>	42

Valores y parámetros de simulación:

Objetivo: obras por proyecto = 20273 m

Obra inicial sin Proyecto = 0 m

Resultado de la simulación = 32 meses

- Oferta hídrica con proyecto

**Tabla 32***Información histórica oferta hídrica con proyecto*

<b>Proyecto</b>	<b>Tiempo en que se logra el objetivo de oferta hídrica del con proyecto (meses)</b>
<b>Pampaconga</b>	50
<b>Limatambo</b>	52
<b>Llaspay</b>	36
<b>Urubamba</b>	48
<b>Salcca</b>	54

Valores y parámetros de simulación:

Objetivo: Oferta hídrica captada con proyecto = 17172 m<sup>3</sup>/mes

Tiempo en el que se logra satisfacer el objetivo = 45 mes

## 4. Información histórica del subsistema suelo agrícola

**Tabla 33***Información histórica suelo agrícola*

<b>Proyecto</b>	<b>Objetivo total Suelo agrícola con proyecto (ha)</b>	<b>Tiempo en que se logra el objetivo al 100% (meses)</b>	<b>Tierra de cultivo inicial (ha)</b>	<b>Porcentaje de incremento de suelo agrícola (%)</b>
<b>Pampaconga</b>	423	50	232,65	55
<b>Limatambo</b>	600	52	428,57	40
<b>Llaspay</b>	135	36	79,41	70
<b>Urubamba</b>	702	48	452,90	55
<b>Salcca</b>	901	54	530,00	70

Valores y parámetros de simulación:

Objetivo Total Suelo agrícola a lograr con el proyecto = 595 ha

Suelo Agrícola sin proyecto = 450 ha

Tasa de Incremento de suelo agrícola = 0.028 (2,8%)

Resultado de la simulación = 46 meses

Incremento de suelo agrícola = 75%

## 5. Información histórica del subsistema producción

**Tabla 34**

*Información histórica volúmenes de producción*

Proyecto	Producción sin proyecto (kg)	Producción máxima con proyecto (kg)	Porcentaje de incremento de producción con proyecto
<b>Pampaconga</b>	8 500,00	19 000,00	123,53
<b>Limatambo</b>	2 200,00	3 800,00	72,72
<b>Llaspay</b>	1 800,00	3 800,00	111,11
<b>Urubamba</b>	1 900,00	4 200,00	121,10
<b>Salcca</b>	7 500,00	21 000,00	180,00

Valores y parámetros de simulación:

Producción sin proyecto = 8 500,00 kg

Producción máxima con proyecto = 16 000,00 kg

Incremento de producción = 88%

**Tabla 35**

*Información histórica de intensidad uso de suelo*

Proyecto	Intensidad de uso de suelo sin proyecto (campañas/año)	Intensidad de uso de suelo con proyecto (campañas/año)	Porcentaje de incremento del uso de suelo
Pampaconga (Papa)	1	1,6	60%
Limatambo (maíz grano)	1	1,8	80%
Llaspay (maíz grano)	0,8	1,5	88%
Urubamba(Maíz blanco grano)	1	1,7	70%

Salcca (papa)	0,95	1,5	58%
Promedio	0,95	1,62	71,2%
Desviación Estándar	0,086	0,13	12,85%

Valores y parámetros de simulación:

Intensidad de uso de suelo sin proyecto = 1 campaña/año

Intensidad de uso de suelo con proyecto = 1,65 campañas/año

Porcentaje de incremento de uso de suelo = 65%

### 3.6.2. Análisis de datos

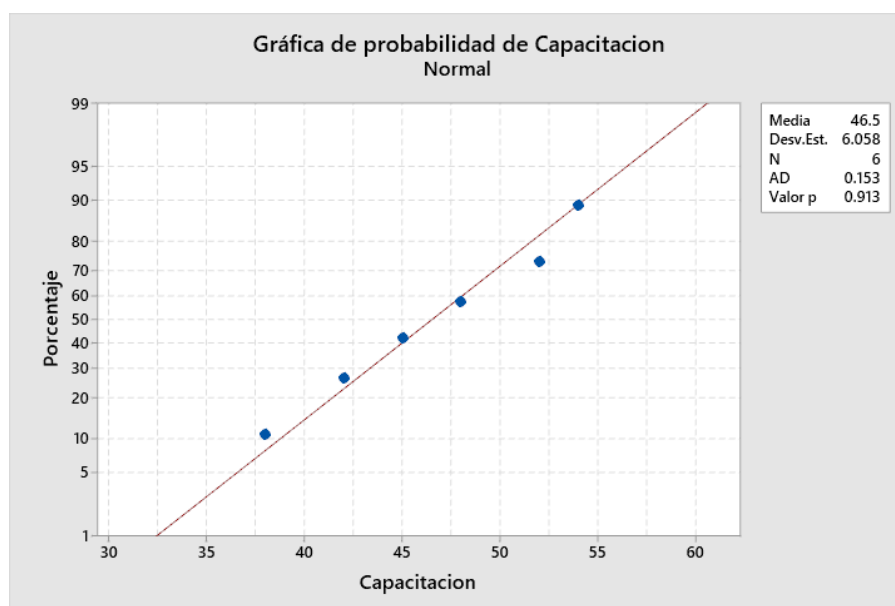
#### 1. Prueba de normalidad

En esta sección del documento realizaremos la prueba de normalidad de los datos históricos recolectados junto con los resultados de simulación.

- Capacitación

#### Figura 78

Gráfico de probabilidad AD de información de tiempo en que finalizan las capacitaciones

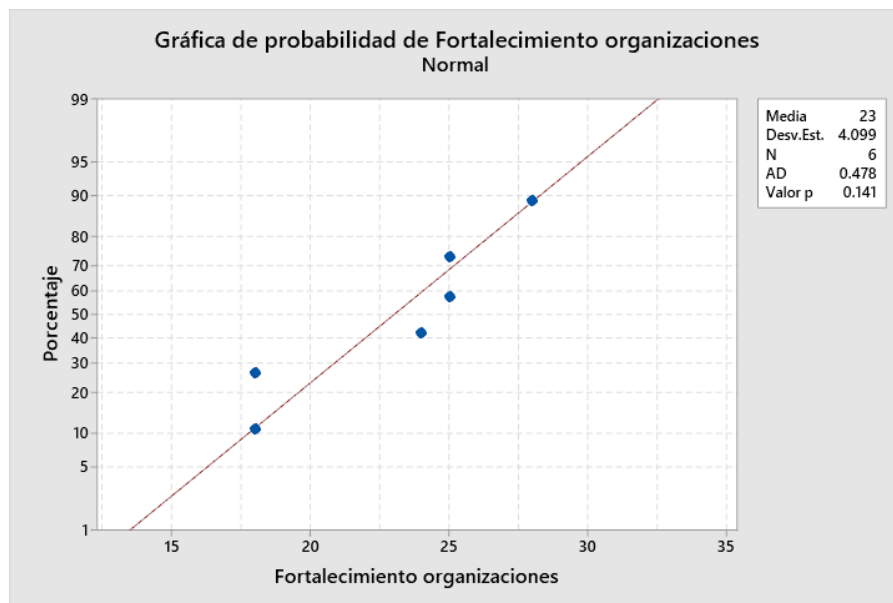


Como se puede observar el valor  $p = 0.913$ , es superior a 0.05 por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de tiempo para culminar las capacitaciones tiene un comportamiento normal.

- Fortalecimiento de la organización de regantes

### Figura 79

Gráfico de probabilidad AD de tiempo para fortalecimiento de organización de regantes

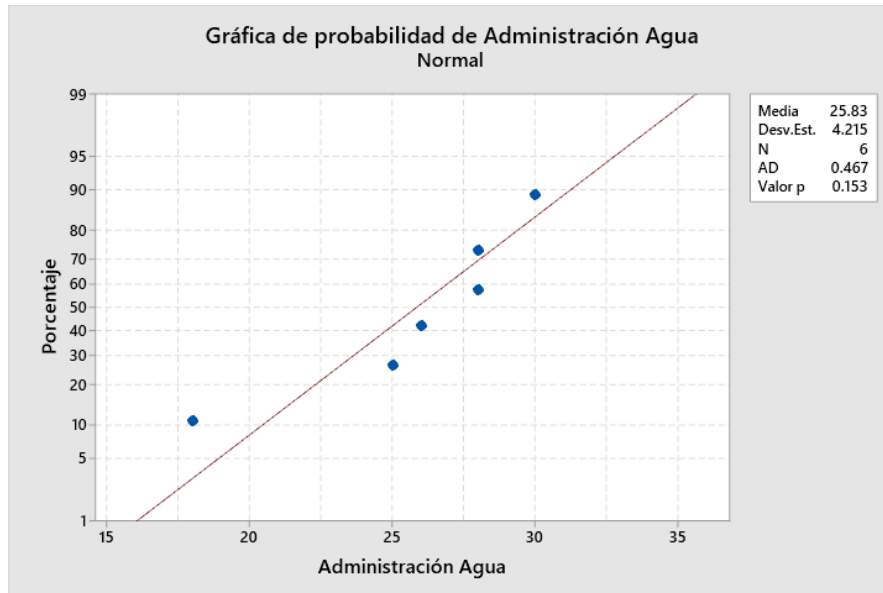


Como se puede observar el valor  $p = 0.141$ , es superior a 0.05 por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de tiempo para lograr el fortalecimiento de la organización de regantes tiene un comportamiento normal.

- Administración del agua

**Figura 80**

*Gráfico de probabilidad AD de tiempo para lograr administración del agua*

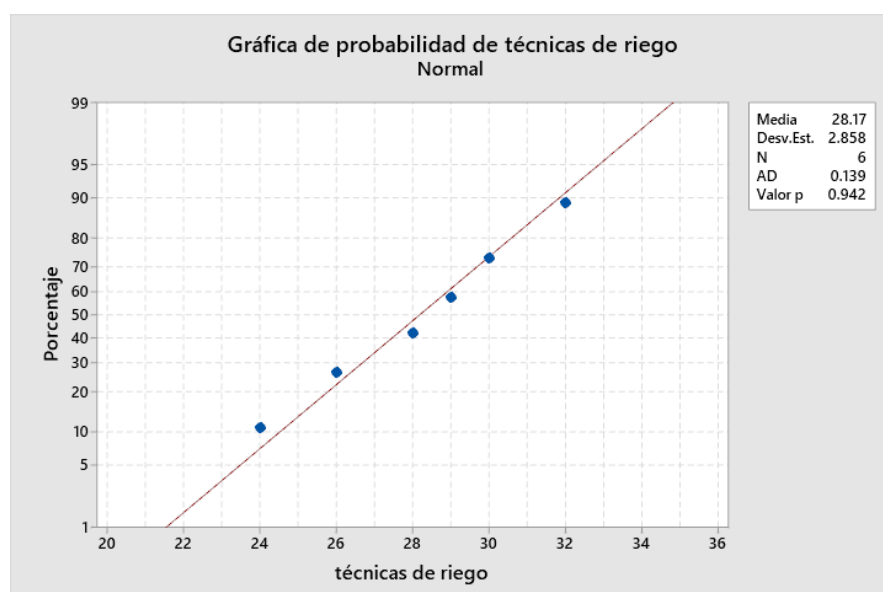


Como se puede observar el valor  $p = 0.153$ , que es superior a  $0.05$  por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de tiempo para lograr el conocimiento para la administración del agua tiene un comportamiento normal.

- Eficiencia en la aplicación de técnicas de riego

**Figura 81**

*Gráfico de probabilidad AD de tiempo para lograr eficiencia en técnicas de riego*

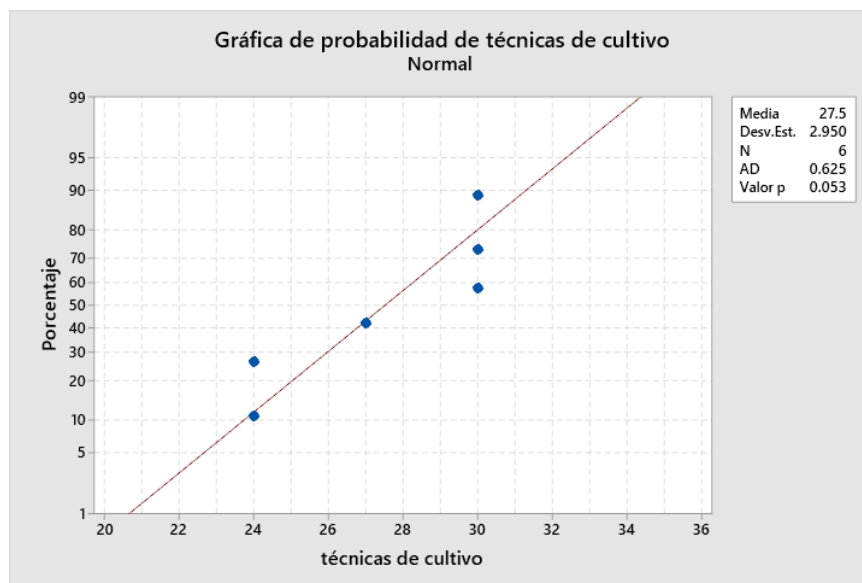


Como se puede observar el valor  $p = 0.942$ , que es superior a  $0.05$  por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de tiempo para lograr eficiencia en técnicas de riego tiene un comportamiento normal.

- Eficiencia en la aplicación de técnicas de cultivo

### Figura 82

Gráfico de probabilidad AD de tiempo para la aplicación de técnicas de cultivo

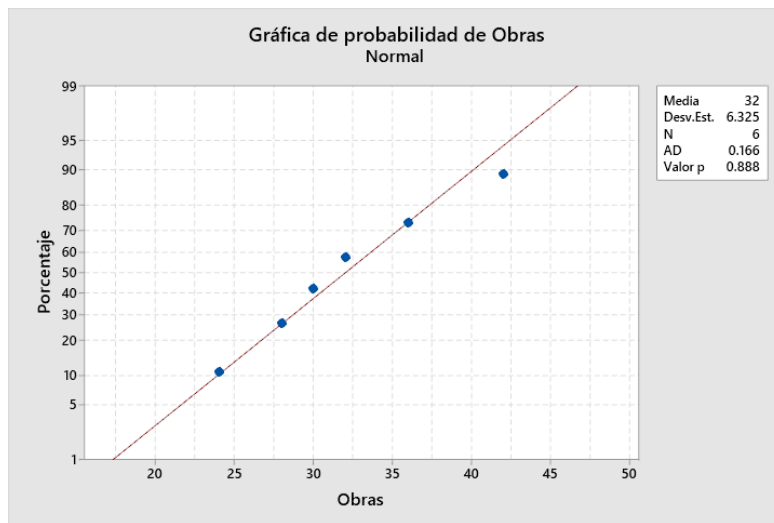


Como se puede observar el valor  $p = 0.053$ , que es superior a  $0.05$  por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de tiempo para lograr eficiencia en técnicas de cultivo tiene un comportamiento normal.

- Obras

**Figura 83**

*Gráfico de probabilidad AD para tiempo para culminar obras*

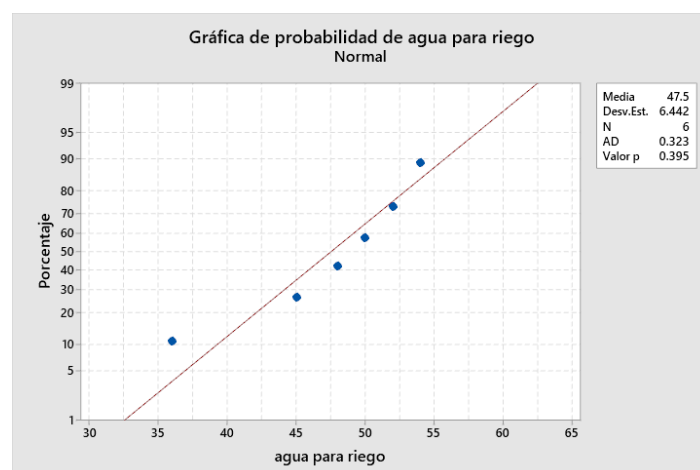


Como se puede observar el valor  $p = 0.888$ , que es superior a 0.05 por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de tiempo para la culminación de obras tiene un comportamiento normal.

- Agua para riego

**Figura 84**

*Gráfico de función de probabilidad AD tiempo para lograr oferta hídrica*

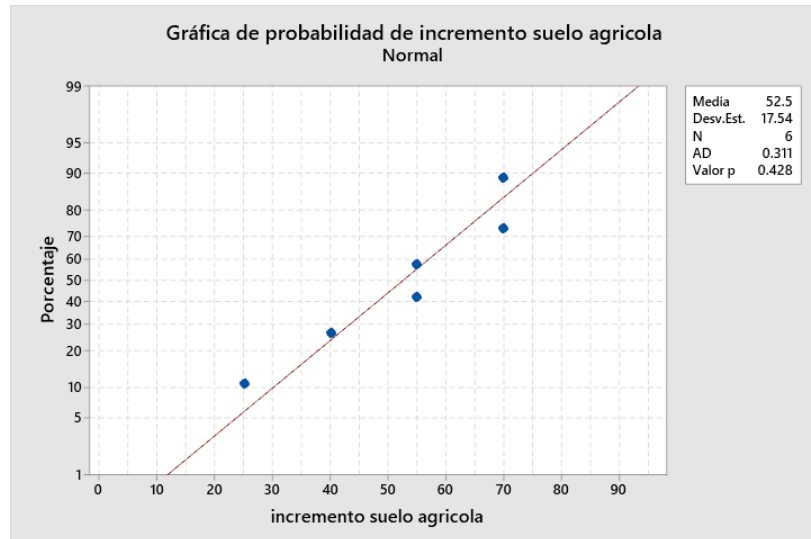


Como se puede observar el valor  $p = 0.395$ , que es superior a 0.05 por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de tiempo para lograr el objetivo de agua para riego tiene un comportamiento normal.

- Incremento de suelo agrícola

**Figura 85**

*Gráfico de probabilidad AD de porcentaje de incremento de suelo agrícola*

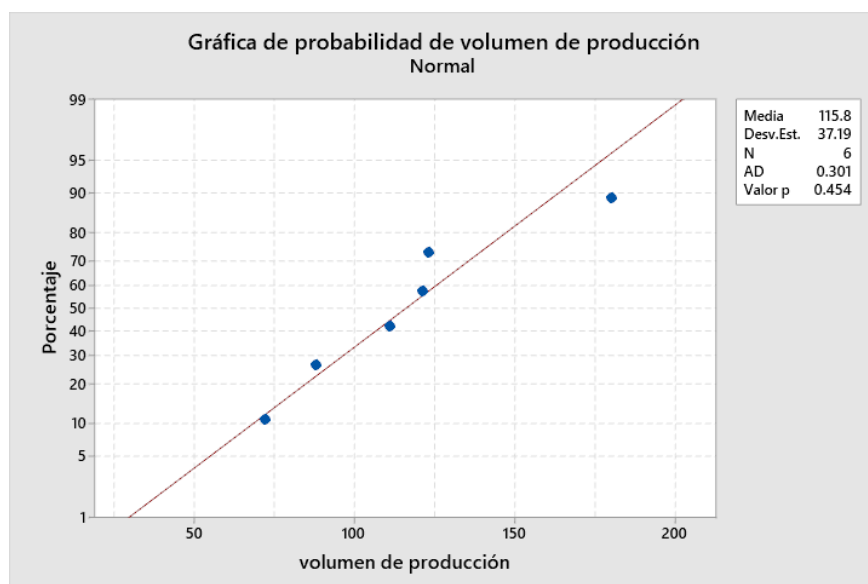


Como se puede observar el valor  $p = 0.428$ , que es superior a 0.05 por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de porcentaje de incremento de suelo agrícola tiene un comportamiento normal.

- Volumen de producción

**Figura 86**

*Gráfico de probabilidad AD de porcentaje de incremento de volumen de producción*

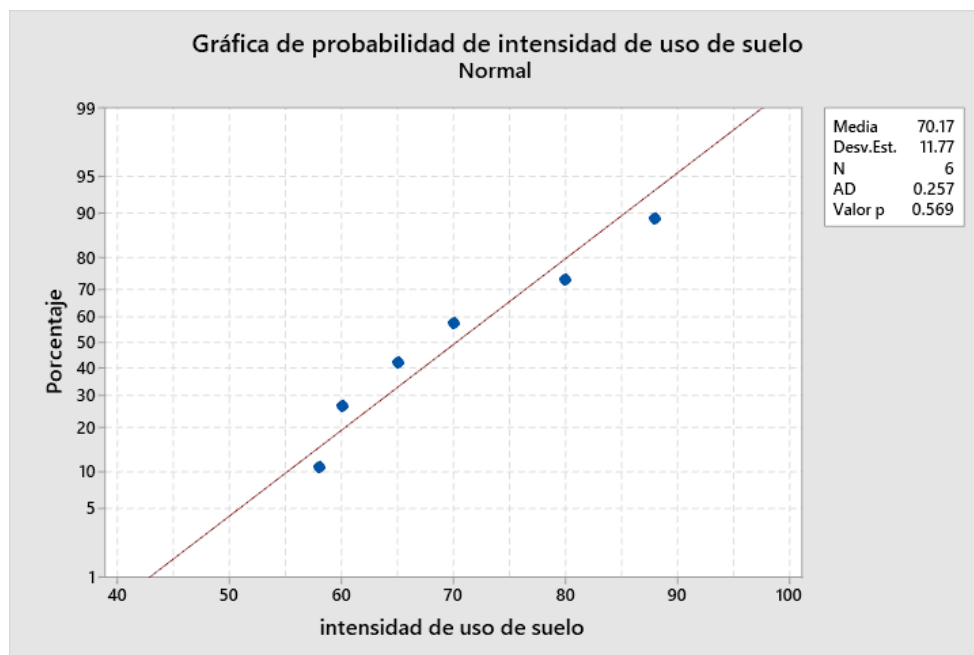


Como se puede observar el valor  $p = 0.454$ , que es superior a 0.05 por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de porcentaje de incremento de volumen de producción tiene un comportamiento normal.

- Intensidad de uso de suelo

### Figura 87

*Gráfico de probabilidad AD de porcentaje de incremento de intensidad de uso de suelo*



Como se puede observar el valor  $p = 0.569$ , que es superior a 0.05 por lo cual podemos afirmar que según la prueba de normalidad de Anderson Darling la información de porcentaje de incremento de intensidad de uso de suelo tiene un comportamiento normal.

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Contrastación de hipótesis

Para la prueba de hipótesis se utilizó la prueba de Anderson Darglin para determinar la normalidad de los datos históricos y los simulados.

#### 4.1.2. Hipótesis secundaria 1

Hi: Es factible formular y evaluar el modelo matemático de optimización y las funciones de decisión de los sistemas de producción para los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región Cusco utilizando dinámica de sistemas e investigación de operaciones.

#### - Aplicación de Anderson Darling

#### Prueba de normalidad de los resultados del modelo de simulación<sup>10</sup>

p: valor para la prueba de bondad de ajuste.

H0: Los datos siguen una distribución especificada (normal).

H1: Los datos no siguen una distribución especificada (normal).

#### Estadística descriptiva

**Tabla 36**

*Estadística descriptiva de subsistema e indicador*

Subsistema	Indicador	N	Media	Desv. Est.
Capacitación	Tiempo en que finalizan las capacitaciones (meses)	6	46,5	6,058
Organización	Tiempo en que se logra el fortalecimiento de organizaciones al 100% (meses)	6	23	4,099
	Tiempo en que se logra la administración del agua al 100% (meses)	6	25,83	4,215
	Tiempo en que se logra la aplicación de técnicas de riego al 100% (meses)	6	28,17	2,858
	Tiempo en que se lograr la aplicación de técnicas de cultivo al 100% (meses)	6	27,5	2,950

<sup>10</sup> <https://support.minitab.com/es-mx/minitab>

Obras	Tiempo en que se lograr culminar la obra al 100% (meses)	6	32	6,325
Agua para riego	Tiempo en que se lograr captar el objetivo de oferta hídrica (meses)	6	47,5	6,442
Suelo agrícola	Porcentaje de incremento de suelo agrícola	6	52,5	17,54
Producción	Porcentaje de incremento de producción con proyecto	6	115,8	37,19
	Porcentaje de incremento de intensidad de uso de suelo	6	70,17	11,77

## Prueba

**Tabla 37**

*Valor p de los subsistemas*

<b>Subsistema</b>	<b>Indicador</b>	<b>Valor p</b>
<b>Capacitación</b>	Tiempo en que finalizan las capacitaciones (meses)	0,913
<b>Organización</b>	Tiempo en que se logra el fortalecimiento de organizaciones al 100% (meses)	0,141
	Tiempo en que se logra la administración del agua al 100% (meses)	0,153
	Tiempo en que se logra la aplicación de técnicas de riego al 100% (meses)	0,942
	Tiempo en que se lograr la aplicación de técnicas de cultivo al 100% (meses)	0,053
<b>Obras</b>	Tiempo en que se lograr culminar la obra al 100% (meses)	0,888
<b>Agua para riego</b>	Tiempo en que se lograr captar el objetivo de oferta hídrica (meses)	0,395
<b>Suelo agrícola</b>	Porcentaje de incremento de suelo agrícola	0,428
<b>Producción</b>	Porcentaje de incremento de producción con proyecto	0,454
	Porcentaje de incremento de intensidad de uso de suelo	0,569

## Regla de decisión

Valor  $p > 0.05$ , entonces se rechaza  $H_1$

## Resultado de la hipótesis secundaria 1

Se realizó la prueba de Anderson Darling con lo cual se determinó que “los datos siguen una distribución normal”. Por tanto se valida el modelo de simulación y por ende el modelo de optimización y las funciones de decisión de los de producción para los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región Cusco utilizando dinámica de sistemas e investigación de operaciones.

#### 4.1.3. Hipótesis secundaria 2

Hi: Es factible determinar los valores óptimos de los sistemas de producción de los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región Cusco utilizando métodos analíticos y algoritmos genéticos.

- Aplicación de Kuhnt Tucker

Para un máximo en el primer cuadrante se puede resumir como:  $f'(x) \leq 0$ ;  $x \geq 0$  y  $xf'(x) = 0$ .

H0: Los datos cumplen con las condiciones de Kuhnt Tucker.

H1: Los datos no cumplen con las condiciones de Kuhnt Tucker.

### Prueba

**Tabla 38**

*Funciones objetivo y restricciones*

<b>Función Objetivo</b> $Max Z = 16X_1X_2 - 11,14X_1$	<b>Variables</b> $X_1, X_2, X_3, X_4 \geq 0$	<b>Constantes</b> $\lambda, \alpha, \beta, \gamma \geq 0$
$Min Z = X_1X_2 + 65X_3 + 45X_4 + 65X_5$ + $65X_6 + X_7$ + $0.7X_8 + 2.27X_9$ + $160X_{10} + 75X_{11}$ + $35X_{12} + 25X_{13}$ + $234X_{14} + 15X_{15}$ + $25X_{16} + 35X_{17}$ + $0.01X_{18}$	$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10},$ $X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{18}$ $\geq 0$	$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, n, \theta, i, k,$ $\mu, \gamma, \vartheta, \pi, \rho, \tau, \varphi, \omega \geq 0$

### Regla de decisión

Valor  $X_{1\dots n}, \alpha_{1\dots n} > 0$ , entonces se rechaza H1

### Resultado de la hipótesis secundaria 2

Las funciones objetivo cumplen las condiciones de Kuhn Tucker determinó. Por tanto Es factible determinar los valores óptimos de los sistemas de producción de los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región Cusco utilizando métodos analíticos.

- Aplicación de algoritmos genéticos

Si la generación cumple la función fitness de acuerdo a las restricciones y los parámetros de tamaño de población=100, probabilidad de cruzamiento=0,65 y probabilidad de mutación = 0.08.

De acuerdo a los operadores de selección sexual y selección por torneo.

H0: Los datos cumplen con la función de fitness.

H1: Los datos no cumplen con la función de fitness.

### Prueba

**Tabla 39**

Número de generaciones que logran el máximo global

Corrida	Selección por torneo	Selección sexual
1	16	13
2	14	16
3	17	14
4	7	14
5	18	13
6	8	16

7	16	17
8	9	15
9	17	14
10	12	19
<b>Mínimo</b>	7	13
<b>Máximo</b>	18	19
<b>Promedio</b>	13,4	15,1

### **Regla de decisión**

Número de generaciones en lograr máximo global  $> 0$ , entonces se rechaza H1

### **Resultado de la hipótesis secundaria 2**

Los datos cumplen con la función fitness. Por tanto Es factible determinar los valores óptimos de los sistemas de producción de los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región Cusco utilizando algoritmos genéticos.

## **4.2. Análisis e interpretación**

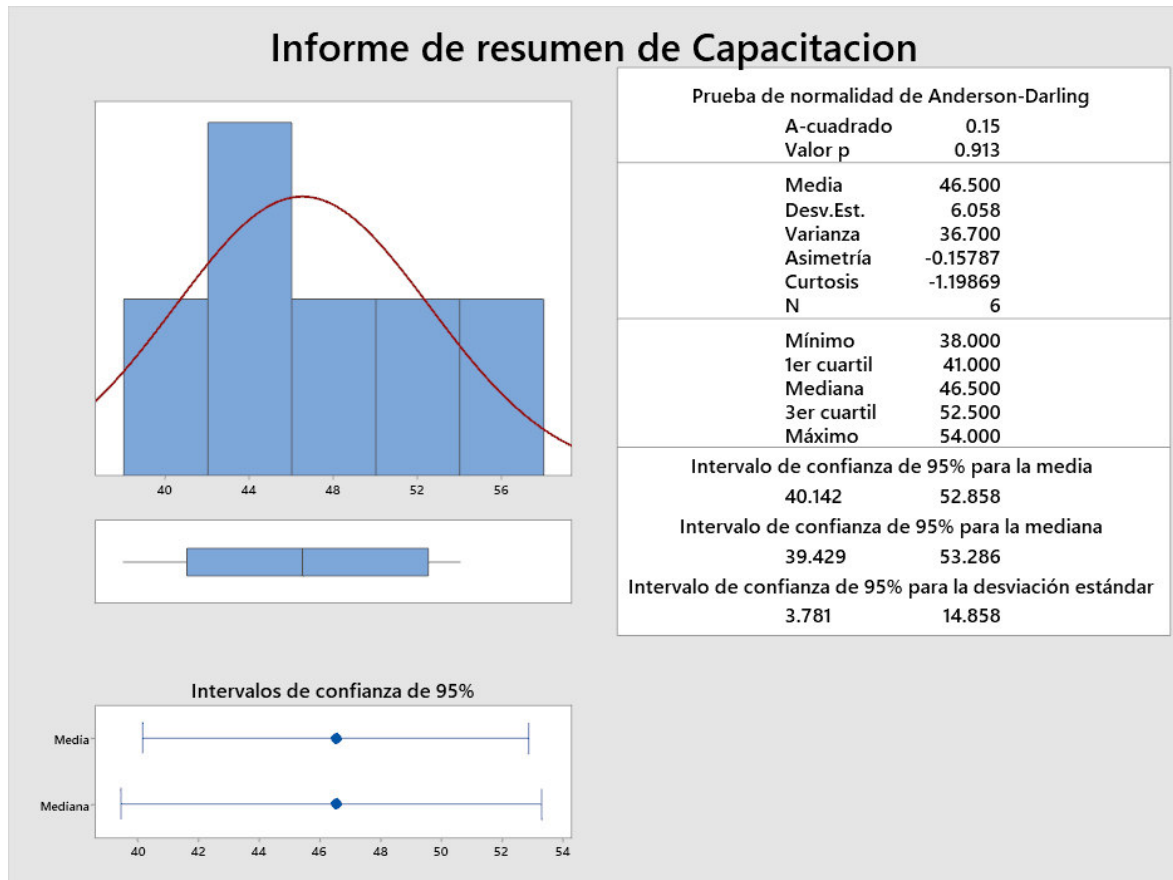
Para el análisis de los resultados se considerarán los datos obtenidos en los indicadores de los resultados de la variable dependiente “modelo de optimización” y la variable dependiente “administración de los sistemas de producción agrícola de los proyectos de mejoramiento de riego”.

### **4.2.1. Subsistema capacitación**

El tiempo en el que terminan las capacitaciones.

Figura 88

Estadísticas de subsistema capacitación



- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.913$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 46.5 meses que indica el tiempo en que culminan las capacitaciones.
- La varianza es de 36.7 meses que es la variabilidad respecto a la media.
- La asimetría es de -0.157 que es menor que 0, que indica que la distribución tiene una asimetría negativa.
- La curtosis en la evaluación es de -1.198 que es menor a 0, que indica que hay muy poca concentración de datos en la media, presentando una curva de forma achatada.
- 1er cuartil es de 41, lo que indica que el 25% de los valores son menor o igual a 41.
- La mediana es 46.5, lo que indica que el 50% de los valores son menor o igual a 46.5.
- 3er cuartil es 52.5, lo que indica que el 75% son menor o igual a 52.5.

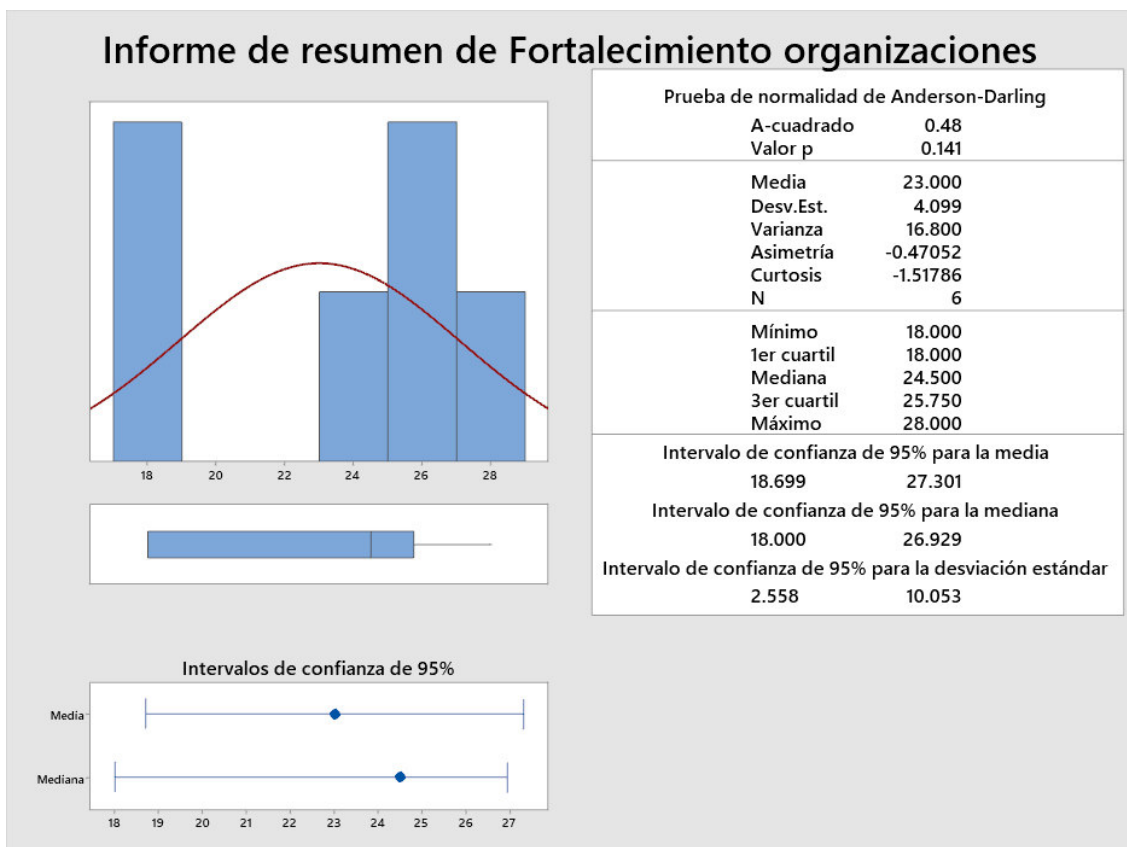
- El intervalo de confianza de 95% para la media está entre 40.142 y 52.858 y está ligeramente por encima de 52.5%.

#### 4.2.2. Subsistema organización

- Fortalecimiento de organización de regantes

**Figura 89**

*Estadística de fortalecimiento de organización de regantes*



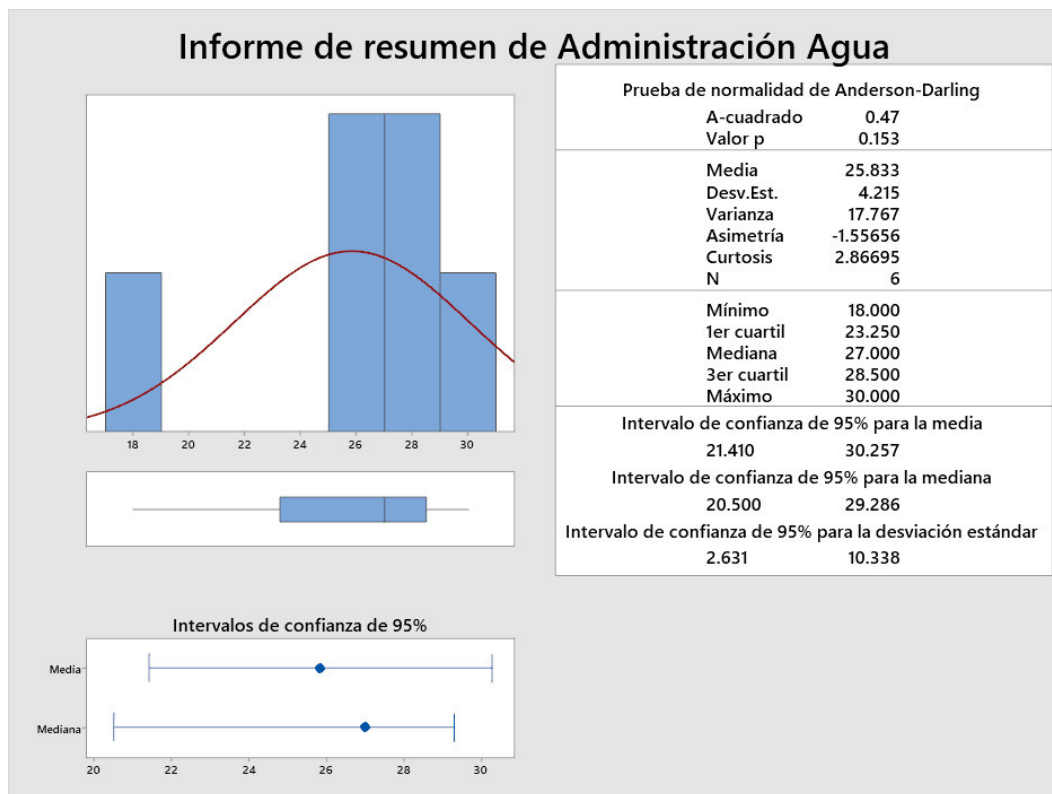
- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.141$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 23 meses que indica el tiempo en que culminan el fortalecimiento de las organizaciones.
- La varianza es de 16.8 meses que es la variabilidad respecto a la media.
- La asimetría es de -0.4702 que es menor que 0, que indica que la distribución tiene una asimetría negativa.

- La curtosis en la evaluación es de -1.517 que es menor a 0, que indica que hay muy poca concentración de datos en la media, presentando una curva de forma achatada.
- 1er cuartil es de 18, lo que indica que el 25% de los valores son menor o igual a 18.
- La mediana es 24.5, lo que indica que el 50% de los valores son menor o igual a 24.5.
- 3er cuartil es 25.75, lo que indica que el 75% son menor o igual a 25.75.
- El intervalo de confianza de 95% para la media está entre 18.69 y 27.301 y está por debajo de 52.5%.

#### 4.2.3. Administración del agua

**Figura 90**

*Estadísticas de administración de agua*



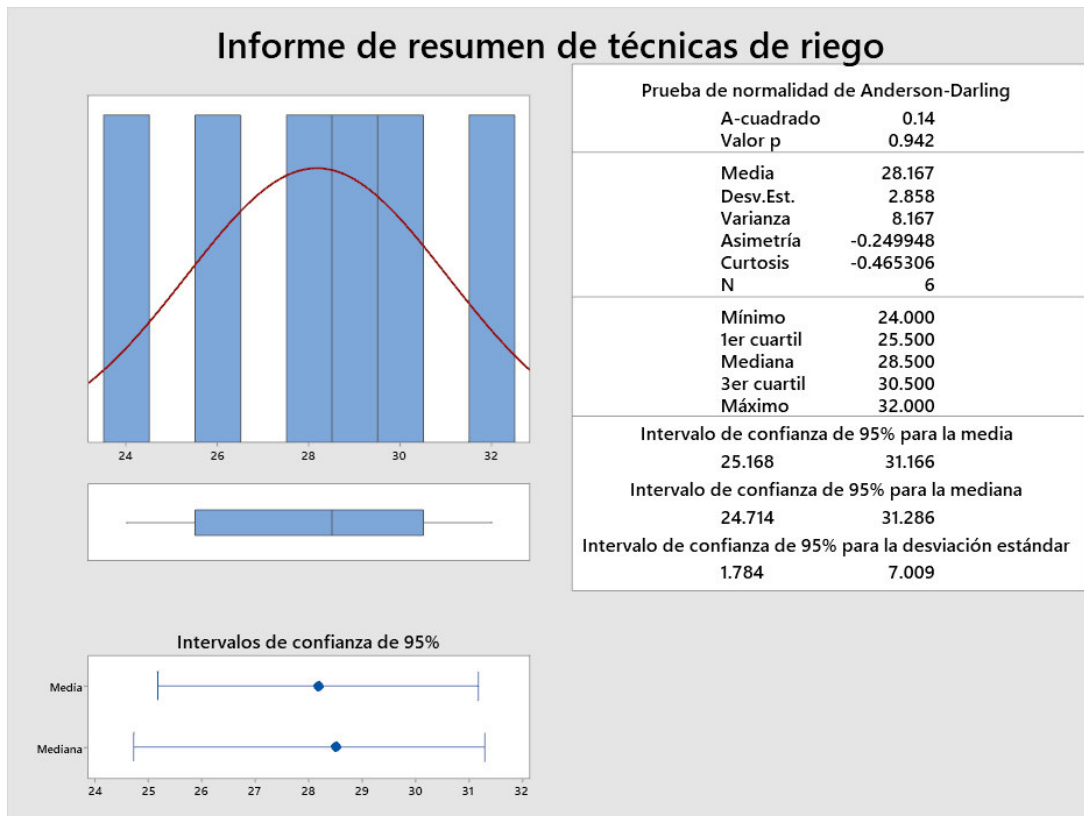
- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.153$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 25.83 meses que indica el tiempo en que se aprende la administración del agua.
- La varianza es de 17.767 meses que es la variabilidad respecto a la media.

- La asimetría es de  $-1.556$  que es menor que  $0$ , que indica que la distribución tiene una asimetría negativa.
- La curtosis en la evaluación es de  $2.866$  que es mayor a  $0$ , que indica que hay mucha concentración de datos en la media, presentando una curva de forma alargada.
- 1er cuartil es de  $23.25$ , lo que indica que el  $25\%$  de los valores son menor o igual a  $23.25$ .
- La mediana es  $25.833$ , lo que indica que el  $50\%$  de los valores son menor o igual a  $25.833$ .
- 3er cuartil es  $28.5$ , lo que indica que el  $75\%$  son menor o igual a  $28.5$ .
- El intervalo de confianza de  $95\%$  para la media está entre  $21.41$  y  $30.257$  y está por debajo de  $52.5\%$ .

#### 4.2.4. Eficiencia de la aplicación de técnicas de riego

**Figura 91**

*Estadísticas de eficiencia de la aplicación de técnicas de riego*



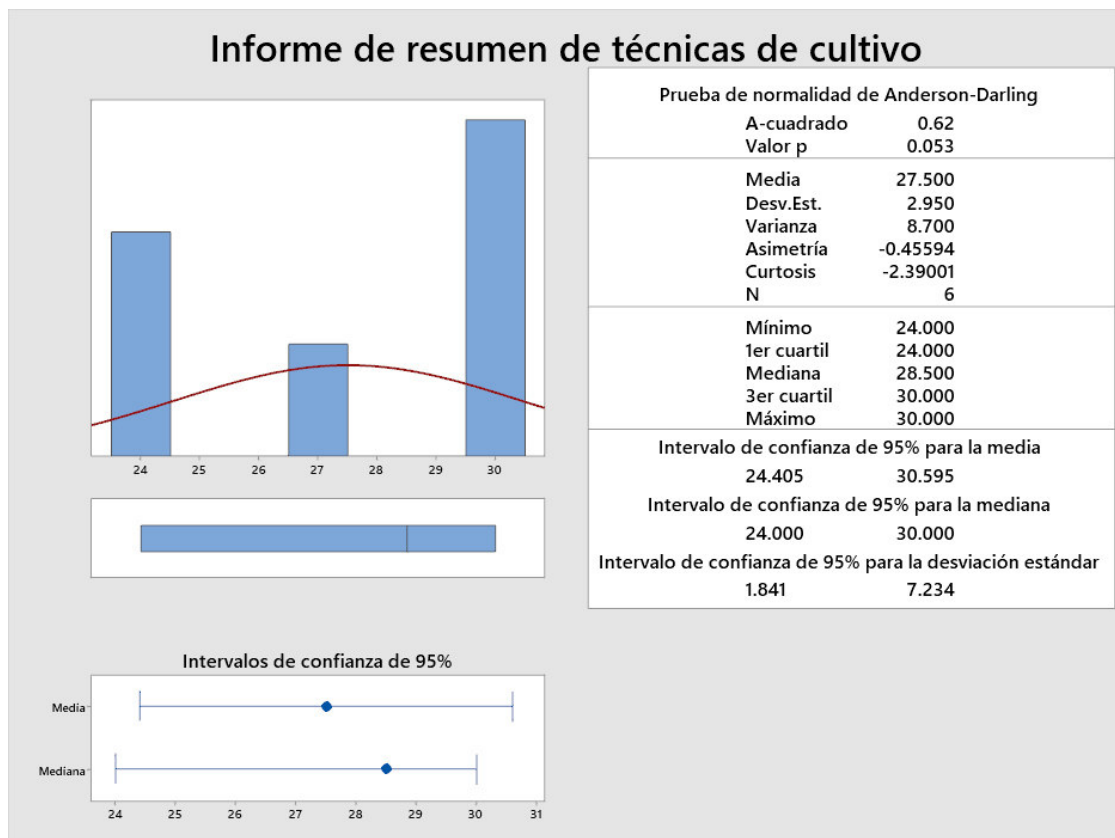
- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.942$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 28.167 meses que indica el tiempo en que se logra la eficiencia en la aplicación de técnicas de riego.
- La varianza es de 8.167 meses que es la variabilidad respecto a la media.
- La asimetría es de -0.249 que es menor que 0, que indica que la distribución tiene una asimetría negativa.
- La curtosis en la evaluación es de -0.465 que es menor a 0, que indica que hay poca concentración de datos en la media, presentando una curva de forma achatada.
- 1er cuartil es de 25.50, lo que indica que el 25% de los valores son menor o igual a 25.50.
- La mediana es 28.5, lo que indica que el 50% de los valores son menor o igual a 28.5.

- 3er cuartil es 30.5, lo que indica que el 75% son menor o igual a 30.5.
- El intervalo de confianza de 95% para la media está entre 25.168 y 31.166 y está por debajo de 52.5%.

#### 4.2.5. Eficiencia de la aplicación de técnicas de cultivo

**Figura 92**

*Estadísticas de eficiencia de la aplicación de técnicas de cultivo*



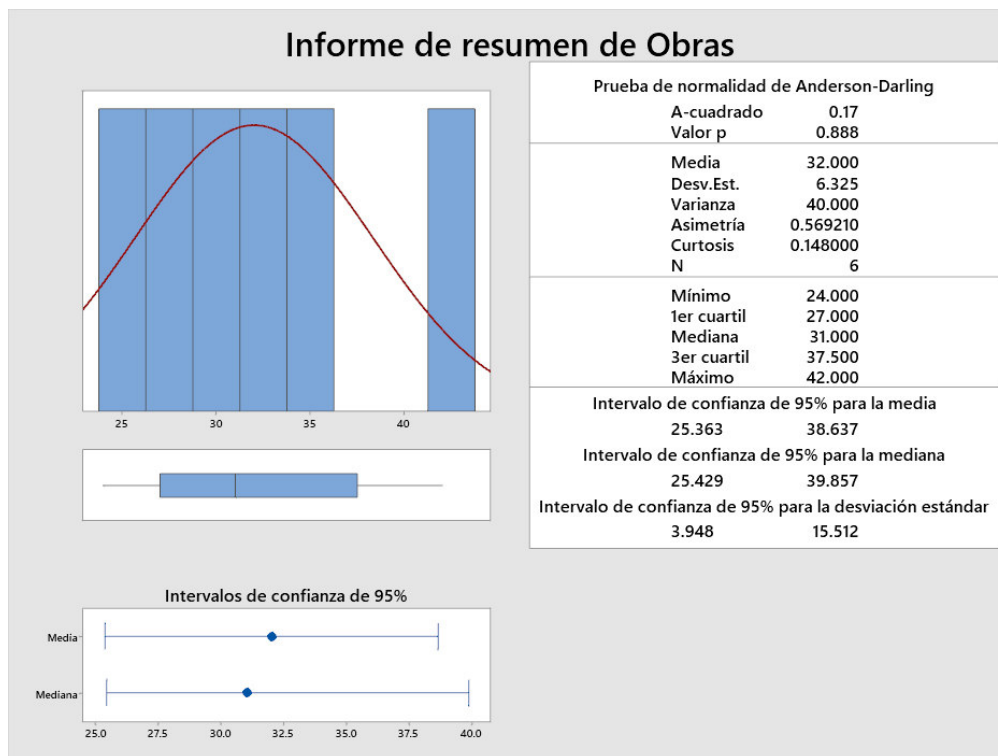
- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.053$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 27.5 meses que indica el tiempo en que se logra la eficiencia en las técnicas de cultivo.
- La varianza es de 8.7 meses que es la variabilidad respecto a la media.
- La asimetría es de -0.455 que es menor que 0, que indica que la distribución tiene una asimetría negativa.

- La curtosis en la evaluación es de -2.39 que es menor a 0, que indica que hay poca concentración de datos en la media, presentando una curva de forma achatada.
- 1er cuartil es de 24.00, lo que indica que el 25% de los valores son menor o igual a 24.00.
- La mediana es 28.5, lo que indica que el 50% de los valores son menor o igual a 28.5.
- 3er cuartil es 30.0, lo que indica que el 75% son menor o igual a 30.0.
- El intervalo de confianza de 95% para la media está entre 24.405 y 30.595 y está por debajo de 52.5%.

#### 4.2.6. Subsistema obras

**Figura 93**

*Estadísticas subsistema obras*



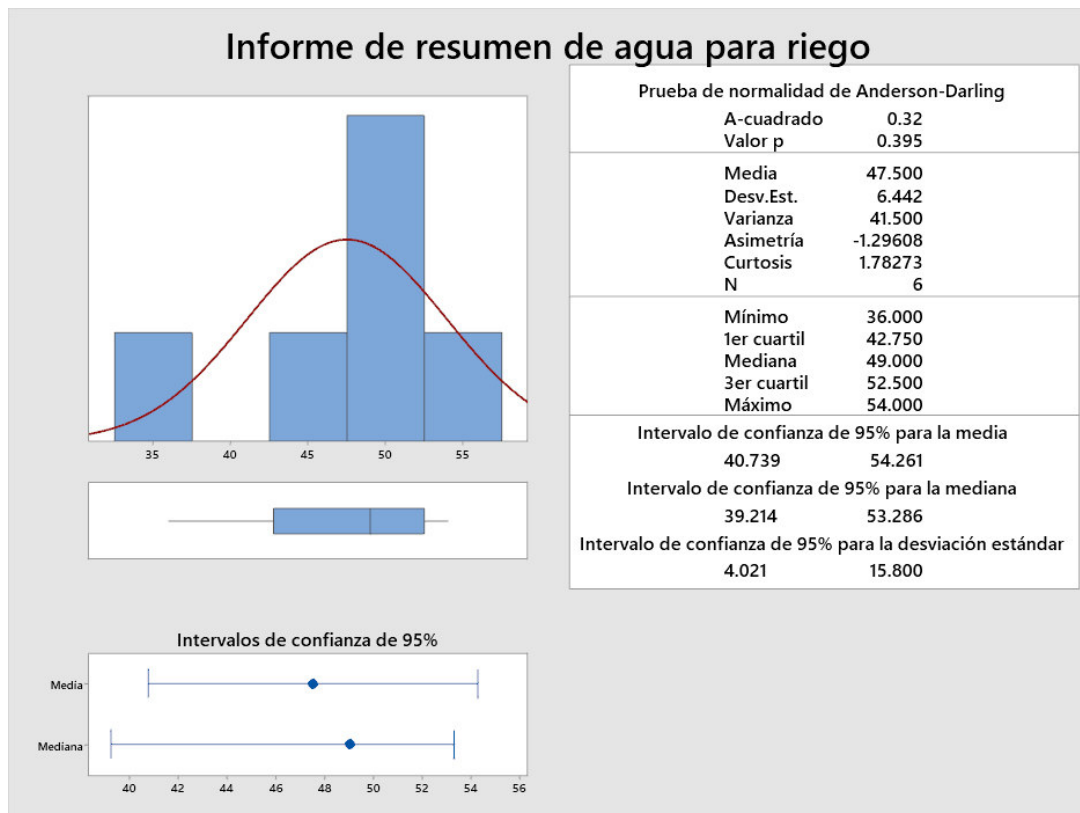
- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.888$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 32.0 meses que indica el tiempo en que se logra la eficiencia en las técnicas de cultivo.
- La varianza es de 40.0 meses que es la variabilidad respecto a la media.

- La asimetría es de 0.569 que es mayor que 0, que indica que la distribución tiene una asimetría positiva.
- La curtosis en la evaluación es de 0.148 que es mayor a 0, que indica que hay mucha concentración de datos en la media, presentando una curva de forma alargada.
- 1er cuartil es de 27.00, lo que indica que el 25% de los valores son menor o igual a 27.00.
- La mediana es 31.0, lo que indica que el 50% de los valores son menor o igual a 31.0.
- 3er cuartil es 37.5, lo que indica que el 75% son menor o igual a 37.5.
- El intervalo de confianza de 95% para la media está entre 25.363 y 38.637 y está por debajo de 52.5%.

#### 4.2.7. Subsistema agua para riego

**Figura 94**

*Estadísticas agua para riego*



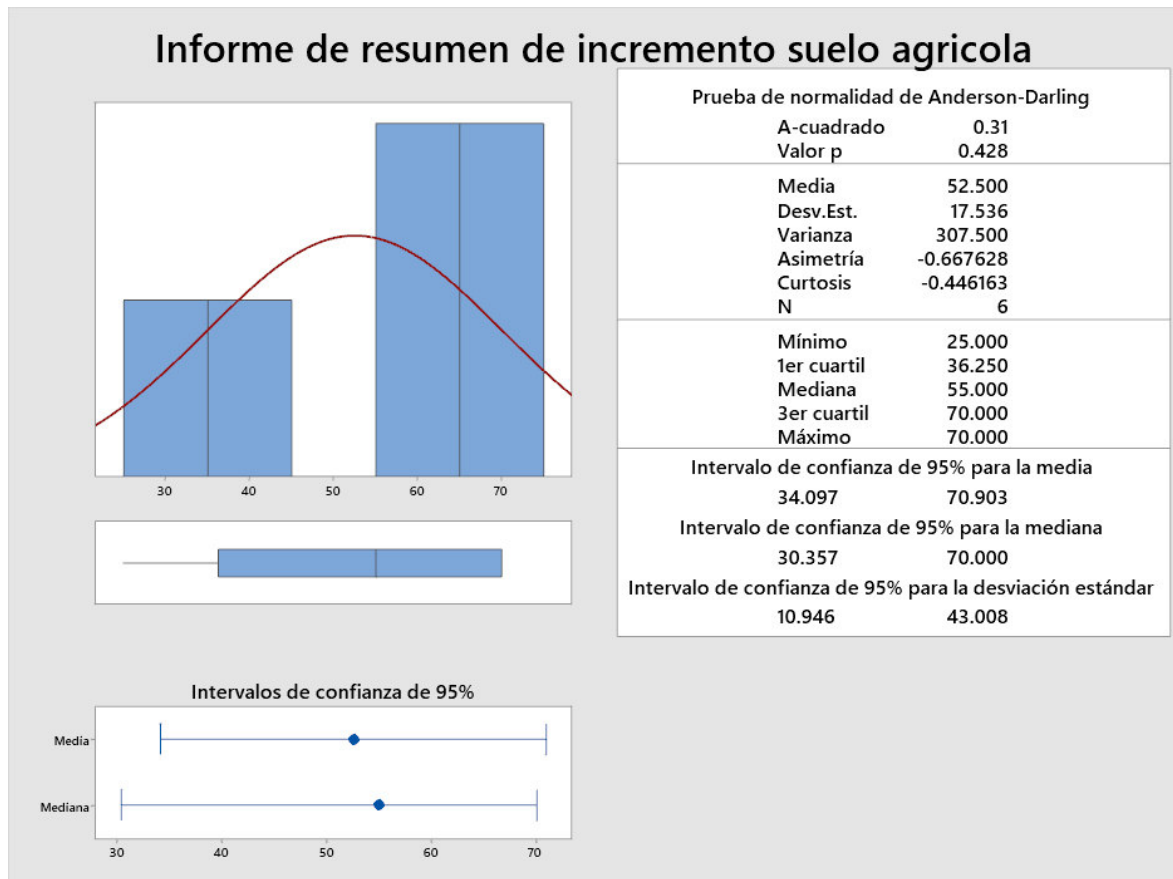
- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.395$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 47.5 meses que indica el tiempo en que se logra la eficiencia en las técnicas de cultivo.
- La varianza es de 41.5 meses que es la variabilidad respecto a la media.
- La asimetría es de -1.29 que es menor que 0, que indica que la distribución tiene una asimetría negativa.
- La curtosis en la evaluación es de 1.782 que es mayor a 0, que indica que hay mucha concentración de datos en la media, presentando una curva de forma alargada.
- 1er cuartil es de 42.75, lo que indica que el 25% de los valores son menor o igual a 42.75.
- La mediana es 49, lo que indica que el 50% de los valores son menor o igual a 49.

- 3er cuartil es 52.5, lo que indica que el 75% son menor o igual a 52.5.
- El intervalo de confianza de 95% para la media está entre 40.739 y 54.261 y está ligeramente por encima de 52.5%.

#### 4.2.8. Subsistema suelo agrícola

**Figura 95**

*Estadísticas incremento de suelo agrícola*



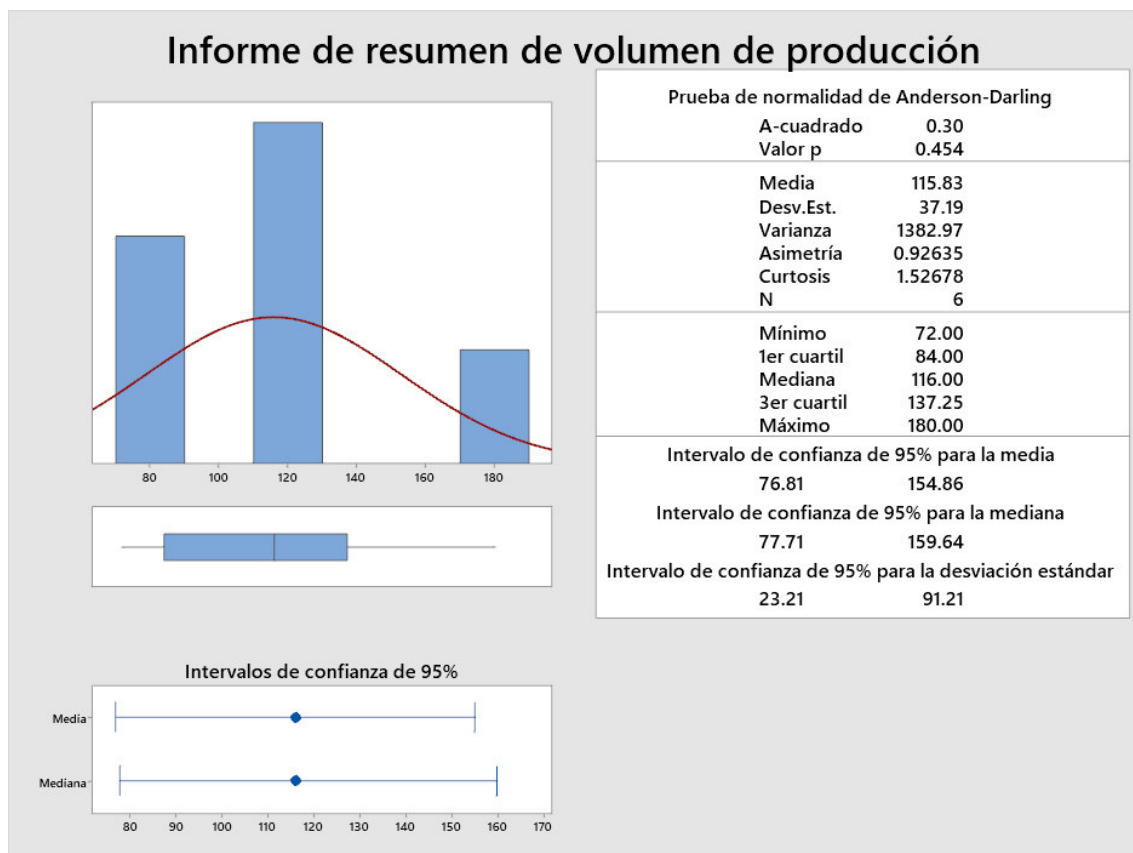
- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.428$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 52.5 por ciento en que se logra incrementar el uso de suelo agrícola.
- La varianza es de 307.5 meses que es la variabilidad respecto a la media.
- La asimetría es de -0.667 que es menor que 0, que indica que la distribución tiene una asimetría negativa.
- La curtosis en la evaluación es de -0.446 que es menor a 0, que indica que hay poca concentración de datos en la media, presentando una curva de forma achatada.
- 1er cuartil es de 36.25, lo que indica que el 25% de los valores son menor o igual a 36.25%.

- La mediana es 55, lo que indica que el 50% de los valores son menor o igual a 55%.
- 3er cuartil es 70.0, lo que indica que el 75% son menor o igual a 70.0.
- El intervalo de confianza de 95% para la media está entre 34.097 y 70.903 y está por encima de 52.5%.

#### 4.2.9. Volumen de producción

**Figura 96**

*Estadísticas incremento volumen de producción*



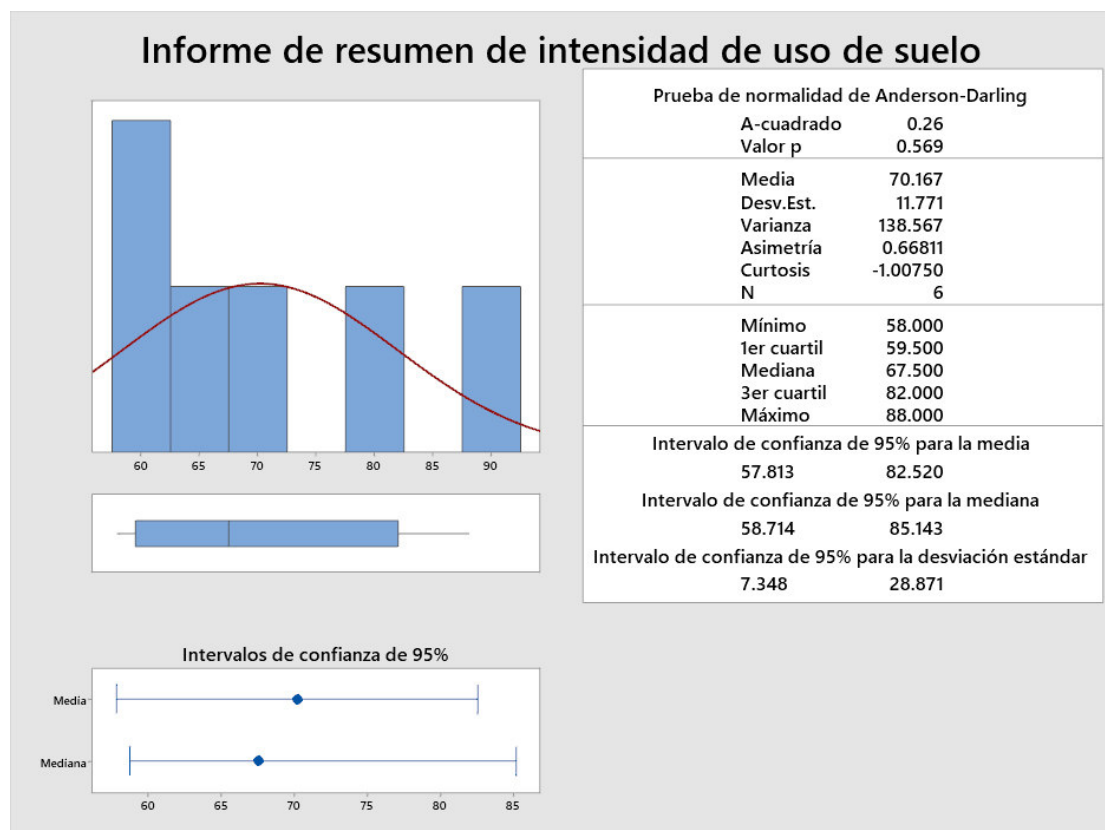
- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.454$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 115.83 por ciento en que se logra incrementar el uso de suelo agrícola.
- La varianza es de 1382.97 meses que es la variabilidad respecto a la media.
- La asimetría es de 0.926 que es mayor que 0, que indica que la distribución tiene una asimetría positiva.

- La curtosis en la evaluación es de 1.526 que es mayor a 0, que indica que hay concentración de datos en la media, presentando una curva de forma alargada.
- 1er cuartil es de 84, lo que indica que el 25% de los valores son menor o igual a 84%.
- La mediana es 116.0, lo que indica que el 50% de los valores son menor o igual a 116%.
- 3er cuartil es 137.25, lo que indica que el 75% son menor o igual a 137.25%.
- El intervalo de confianza de 95% para la media está entre 76.81 y 154.86 y está por encima de 52.5%.

#### 4.2.10. Subsistema intensidad de uso de suelo

**Figura 97**

*Estadísticas de incremento de uso de suelo*



- Los datos muestran un comportamiento normal cuyo resultado  $p = 0.569$  que es mayor a  $\alpha = 0.05$  de la prueba de normalidad de Anderson-Darling.
- La media es 70.167 porcentaje en que se logra incrementar la intensidad de uso de suelo.
- La varianza es de 138.567 que es la variabilidad respecto a la media.

- La asimetría es de 0.668 que es mayor que 0, que indica que la distribución tiene una asimetría positiva.
- La curtosis en la evaluación es de -1.007 que es menor a 0, que indica que hay poca concentración de datos en la media, presentando una curva de forma achatada.
- 1er cuartil es de 59.5, lo que indica que el 25% de los valores son menor o igual a 59.5%.
- La mediana es 67.5, lo que indica que el 50% de los valores son menor o igual a 67.5%.
- 3er cuartil es 82.00, lo que indica que el 75% son menor o igual a 82.00%.
- El intervalo de confianza de 95% para la media está entre 57.81 y 82.52 y está por encima de 52.5%.

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Según los resultados de la contrastación de las dos hipótesis secundarias, en donde se aceptan las hipótesis alternativas existe evidencia suficiente para afirmar que se debe aceptar la hipótesis general, por lo que demostramos que El modelo de optimización de la producción agrícola de los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región del Cusco influye en la administración de los mismos.
- En el análisis estadístico de los datos se demostró que la prueba de normalidad de los datos resultado del modelo de simulación y los datos históricos de las diferentes dimensiones (capacitación, organización, obras, agua para riego, suelo agrícola, producción e intensidad de uso de suelo)  $p$  es mayor a 0.05, parámetro de la prueba de normalidad de Anderson-Darling. Por lo que queda validado el modelo de simulación y por ende el modelo de optimización.
- Luego de realizar la contrastación de hipótesis y análisis de los resultados estadísticos podemos afirmar que en la presente tesis se logró el objetivo de determinar que el modelo de optimización de los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región del Cusco influye en la administración de los mismos.
- El análisis al modelo de optimización y administración de los sistemas de producción de los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región del cusco utilizando métodos analíticos y algoritmos genéticos ha demostrado que es capaz de determinar los máximos y mínimos globales principalmente en base a la utilidad y costos de la producción de los proyectos de mejoramiento de riego implementados. Análisis que servirá para que los proyectistas puedan determinar la sostenibilidad de los proyectos a implementar.

## VI. CONCLUSIONES

- Mediante la formulación del modelo de optimización de los sistemas de producción agrícola se ha determinado que influye en la administración para el mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco, pues se ha logrado determinar las funciones objetivo y restricciones, y las condiciones para lograr maximizar la utilidad, minimizar los costos y el punto de equilibrio. Para lo cual se ha tenido en cuenta el pensamiento de sistemas, herramienta con la que podemos conceptualizar la interacción de los sistemas de producción con su entorno (interacción con el mercado).
- El modelo matemático de optimización influye en la rentabilidad del mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco pues al formular el modelo matemático de optimización de los proyectos de mejoramiento de riego en base a un modelo de simulación desarrollado con dinámica de sistemas con el cual se ha logrado calibrar el modelo y con las técnicas de investigación de operaciones se ha evaluado y seleccionado la optimización no lineal como la técnica adecuada para determinar la función objetivo y sus restricciones. Identificada las técnicas de programación no lineal se ha procedido a determinar los valores óptimos de los sistemas de producción para los proyectos de mejoramiento de riego ejecutados en la región Cusco, esto es la maximización de la utilidad, minimización de costos y el punto de equilibrio, para la validación de los resultados obtenidos se ha verificado que estas cumplan con las condiciones de Khun Tucker.
- Utilizando algoritmos genéticos se ha determinado que influyen en la rentabilidad del mejoramiento de riego en la provincia de Anta Cusco. Pues estos son capaces de determinar los valores óptimos para problemas de optimización no lineal con restricciones. Para esto se han utilizado los operadores de selección por torneo y selección sexual. Siendo

el operador de selección sexual (SS) el que mejor rendimiento muestra para la obtención de óptimos globales.

## VII. RECOMENDACIONES

- Difundir técnicas estadísticas en las organizaciones para el tratamiento de información histórica para conocer mejor la información disponible.
- Promover la implementación de modelos, simulación y optimización; pues permiten conocer más requisitos para el tratamiento de información. Además que con la simulación podemos adelantarnos años para conocer el resultado de las decisiones que tomamos hoy y así determinar principalmente la sostenibilidad de los proyectos a implementar.
- Promover el uso de métodos de aprendizaje de máquinas como los algoritmos genéticos pues la gran inversión de los países en estos métodos indica que será utilizados para la administración de sistemas complejos.
- Los profesionales deben participar en el desarrollo de proyectos multidisciplinarios (salud, desarrollo agrícola, ecología, etc.) de su comunidad. pues el trabajo multidisciplinario es el que aporta soluciones adecuadas en temas de relevancia para el desarrollo sostenible de nuestras regiones.

## VIII. REFERENCIAS

- Aarts Emile, K. J. (1989). Simulated Annealing. *Search Methodologies Springer, Boston, MA*, 187-210.
- Ackoff, R. (1995). *Rediseñando el Futuro*. Limusa.
- Alberti Giorgio, M. E. (1974). *Reciprocidad e Intercambio en los Andes Peruanos*. IEP Ediciones.
- Arancil, J. (1995). *Introducción a la Dinámica de Sistemas*. Ediciones Deusto.
- Arbones Malisani, E. (1991). *Ingeniería de Sistemas* (Primera ed.). Marcombo.
- Ashby, R. (1960). *Design for a Brain: The Origin of Adaptive*. Chapman & Hall.
- Beasley, D., Bull, D., y Martin, R. (1993). An Overview of genetic algorithms: Part 1, foundation. *University Computing*, 58-69.
- Becerra Sánchez, J. J., y Montero Contreras, C. (20 de Julio de 2017). *Papa: Características de la Producción Nacional y de la Comercialización en Lima Metropolitana*. Ministerio de agricultura y Riego.
- Bjarne, F., Bjarne, G., Vidar, G. (2015). Production Optimization – Facilitated by Divide and Conquer Strategies. *IFAC-PapersOnLine (Florianapolis)*,48(6) ,1-8.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.001>
- Bunge, M. (1980). *Epistemología: curso de actualización*. Siglo vetiuno editores.
- Canovas, M. J., Huertas, V., y Sempere, M. (2010). *Optimización Matemática Aplicada*. Editorial Club Universitario.
- Chase, R. B., Jacobs, R., y J., A. N. (2009). *Administración de Operaciones: Producción y Cadena de Suministros* (Duodécima ed.). McGraw-Hill.
- Checkland, P. (1994). *Pensamiento de Sistemas, Practica de Sistemas*. Megabyte.
- Claudius Ptolemaeus, E. (2014). *System Design, Modeling, and Simulation Using Ptolemy II*. Ptolemy.org.

- Collins, J. C., y Porras, J. I. (2000). Construir la visión de su empresa, Barcelona, España, *Harvard Business Review*, 73-102.
- Córdova Huamán, W. (2019). *Modelo operativo componente social para optimizar proyectos en riego en la provincia de Espinar-Cusco*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional Federico Villareal]. Repositorio Institucional UNFV.  
<http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2695>
- Darwin, C. (1859). *On the Origin of Species*. John Murray.
- Davenport, T. H. (2011). Competir mediante el análisis. Barcelona, España, *Harvard Business Review América Latina*, 84(1), 18-28.
- Digalakis, J., y Margaritis, K. (2002). On benchmarking functions for genetic algorithm. *International Journal of Computer Mathematics*, 77(4), 481-506.  
<https://doi.org/10.1080/00207160108805080>
- Drew, D. R. (1995). *Dinámica de Sistemas Aplicada*. Gráfica Marte.
- Elmahdi, A., Malano, H., Etchells, T., & Khan, S. (2005). System Dynamics Optimisation Approach to Irrigation Demand Management. *MODSIM, International Congress on Modelling and Simulation (Melbourne)*, 196-202.
- Eppen, G., Gould, F., Schmidt, C., Moore, J. H., y Weatherford, L. R. (2000). *Investigación de Operaciones en la Ciencia Administrativa*. Pearson Prentice Hall.
- Espinoza Ramos, E. (2009). *Análisis Matemático I* (5ª ed.). Espinoza Ramos Eduardo.
- Forrester, J. W. (1970). Urban Dynamics. *Science(Cambridge)*, 693-694 .
- Froese, T. (2016). De la cibernética a la nueva ciencia cognitiva. *Ciencias, Revista de la Academia Mexicana (Cuernavaca)*, 67(1), 53-58.
- Gestal Pose, M. (01 de noviembre de 2019). *Introducción a los Algoritmos Genéticos*. Sistemas Adaptativos y Bioinspirados en Inteligencia Artificial.  
<http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/AAGGtutorial/aagg.html>

- Goh, K., Lim, A., & Rodriguez, B. (2003). Sexual selection for genetic algorithms. *Artificial Inteligen Review*, 19, 123-152. <https://doi.org/10.1023/A:1022692631328>
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co.
- González Bermúdez, J. F. (2013). *Distribución del ingreso y pobreza en América Latina: Los casos de Argentina, Brasil, Chile y México*. [Tesis doctoral]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- GPER-Inka. (1995). *Capacitación en Manejo y Gestión del Agua*. Plan Meriss Inka.
- Guevara Padilla, J., Flores Bermejo, J., & Ojeda Escudero, M. (2016). *Optimización del proceso de abastecimientos de la empresa Contugas*. Universidad del Pacífico.
- Hughes-Hallet, Gleason, Lock, & al, F. e. (2009). *Cálculo Aplicado*. Grupo Editorial Patria.
- Hurtado Huaman, F. (2014). *Lo que Usted debe Recordad al Formular un Proyecto de Desarrollo Rural*. Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de San del Cusco.
- INEI. (2019). *Informe Técnico Evolución de la pobreza moentaria 2007-2018*. INEI.
- Inka, P. M. (2001). Estudio Definitivo Proyecto de Irrigación Pampacongá. Plan Meriss Inka.
- Jadaan, O., Rajamani, L., & Rao, C. R. (2005). Improved Selection Operator for GA, Nueva Delhi, India. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 4(4),269-277.
- Kafka, F. (1997). *Teoría Económica*. Universidad del Pacífico.
- Kuri, Á., & Galaviz, J. (2002). *Algoritmos genéticos* (1ª ed.). Instituto Politécnico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Luquini, E., & Nizam, O. (2019). Rethinking Exchange Market Models as Optimization Algorithms. *Physica A*, 491. 271-281. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.08.150>.
- Maturana, H., & Francisco, V. (1973). *De Máquinas y Seres Vivos: una Teoría sobre la Organización Biológica*. Editorial Universitaria.

- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *Los Límites de Crecimiento*. Fondo de Cultura Económica.
- Milan Eric, M. S. (2016). Optimización de Parámetros del Procesos de Producción con un Nuevo Modelo Basado en Algoritmos Genéticos y Métodos de Clasificación ABC. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(8), 1-18. <https://doi.org/10.1177/1687814016663477>.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (10 de Enero de 2019). *Ministerio de Agricultura Gobierno del Perú*. Boletín - Papa: Características: <http://www.minagri.gob.pe/portal/analisis-economico/analisis-2017?download=11225:boletin-de-produccion-nacional-de-papa>.
- Ministerio de Agricultura y Riego. (10 de Enero de 2019). *Ministerio de Agricultura y Riego Gobierno del Perú*. Documentos de Análisis Económico Sectorial 2017: <http://www.minagri.gob.pe/portal/analisis-economico/analisis-2017>.
- Mitacc, M., & Toro Mota, L. (2010). *Tópicos de Cálculo* (3ª ed.). Lima: Thales S.R.L.
- Nieto Degregori, L. (1995). *El Agua en Nuestras Manos - Plan Meriss Inka*. Gráficos SR Ltda.
- Oliva López, E. (2009). *Sistema celulares de producción*. Instituto Politécnico Nacional.
- Otero, J. M., Kakes, A., & Marrero, A. (2006). *Modelos de optimización continuos*. Editorial Félix Varela.
- Peru21, R. (31 de Agosto de 2019). *Peru21.pe*. <https://peru21.pe/peru/paro-agrario-esto-exigen-productores-papa-fotos-394112-noticia/>
- Prendes Gero, M. B., García, A. B., & del Coz Díaz, J. J. (2006). *Optimización del diseño y construcción de edificios metálicos en base a algoritmos genéticos*. Ediuno - Universidad de Oviedo.
- Quijano Ponce de León, A. (2009). *Sistema de Producción*. El Cid Editor.
- Rodríguez Diego, F. C. (2004). Optimización de Sistemas de Producción: Esquemas de Optimización en dos fases. *Dialnet*, 20(1), 2-6.

- Rodríguez-Candela, A. S. (2014). *Systems engineering: theory and practice*. Universidad Pontificia Comillas.
- Romero Flores, R. A. (2010). *Modelación y Simulación de Sistemas*. RARF.
- Sarabia, A. A. (1995). *Teoría General de Sistemas*. Gráficas Marte.
- Senge, P. (1998). *La quinta disciplina: el arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje*. Talleres Gráficos Soler.
- Senge, P. (2004). *La quinta disciplina: el arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje* (Segunda ed.). Ediciones Granica.
- Sterman, J., Oliva, R., Linderman, K., & Bendoly, E. (2015). System dynamics perspective and modeling for research in operation management. *Journal of Operation Managment*, 40(1), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2015.07.001>
- Taha, H. A. (2004). *Investigación de Operaciones*. Pearson Prentice Hall.
- Tirado, R., & Greenpeace. (2015). *Agricultura ecológica: los siete principios de un sistema alimentario que se preocupa por la gente*. Greenpeace Internacional.
- Von Bertalanffy, L. (1995). *Teoría General de los sistemas*. Fondo de Cultura Económica.
- Wiener, N. (1985). *Cybernetics*. MIT Press.
- Yamisleydi, S. S. (2016). *Optimización Multiobjetivo Basada en Mallas Variables*. Editorial Universitaria.
- Z.Zhang, W.X.Lu, Zhao, Y., & Song, W. (2014). Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China using system dynamics and analytic hierarchy process. *Ecological Modelling*, 275, 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.031>
- Zhong, J., Hu, X., Gu, M., & Zhang, J. (2005). Comparison of performance between different selection strategies on simple genetic algorithms. In computational intelligence for modeling, control and automatization. *International Conference on Computational*

*Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce*, 1115-1121.  
<https://doi.org/10.1109/CIMCA.2005.1631619>.

**IX. ANEXOS****ANEXO N° 01****FICHA TÉCNICA DE LOS INSTRUMENTOS A UTILIZAR**

A) Fichas de información histórica de los subsistemas.

Paso 1: se define los subsistemas que son parte del sistema de producción y que información histórica es relevante para ser comparada con los resultados de simulación y así validar el modelo de producción propuesto.

Paso 2: Técnica o estrategia de evaluación: recolectar la información histórica de los proyectos ejecutados en la provincia de Anta validada por la oficina respectiva.

Paso 3: información histórica requerida.

- Nombre del proyecto.
- Tiempo en que se logran los objetivos.
- Porcentaje de incremento de suelo agrícola.
- Porcentaje de incremento de producción.
- Porcentaje de incremento de intensidad de uso de suelo.

Paso 4: anotar la información histórica requerida sobre los proyectos en la escala requerida sea meses o porcentaje.

Proyecto	Tiempo en que finalizan las capacitaciones (meses)
Promedio	
Desviación Estándar	

Proyecto	Tiempo en que se logra el fortalecimiento de la organización al 100%	Tiempo en que se logra la administración del agua en 100%	Tiempo en que se logra la aplicación de técnicas de riego al 100%	Tiempo en que se logra el objetivo al 100%
Promedio				
Desviación Estándar				

Proyecto	Tiempo en que se logra el culminar las obras 100%
Promedio	
Desviación Estándar	

Proyecto	Tiempo en que se logra captar la el objetivo de oferta hídrica del con proyecto.
Promedio	
Desviación Estándar	

Proyecto	Objetivo total Suelo agrícola con proyecto	Tiempo en que se logra el objetivo al 100%	Tierra de cultivo inicial	Porcentaje de incremento de suelo agrícola
Promedio				
Desviación Estándar				

Proyecto	Producción sin proyecto (Kg)	Producción máxima con proyecto (Kg)	Porcentaje de incremento de producción con proyecto
Promedio			
Desviación Estándar			

Proyecto	Intensidad de uso de suelo sin proyecto	Intensidad de uso de suelo con proyecto	Porcentaje de incremento del uso de suelo
Promedio			
Desviación Estándar			

