

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**



**“ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS  
EN LOS PROYECTOS ESPECIALES  
CHAVIMOCHIC Y CHINECAS - PERÚ”**

**Presentado por:**

**BORIS YOVANI CONDEZO MONTES**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE EN RECURSOS HÍDRICOS**

**Lima – Perú**

**2021**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS**

**“ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS  
EN LOS PROYECTOS ESPECIALES  
CHAVIMOCHIC Y CHINECAS - PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE  
MAGISTER SCIENTIAE**

**Presentada por:**

**BORIS YOVANI CONDEZO MONTES**

**Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:**

Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo  
**PRESIDENTE**

Ph.D. Eusebio Ingol Blanco  
**ASESOR**

Ph.D. Eduardo Abraham Chávarri Velarde  
**MIEMBRO**

Mg.Sc. Ricardo Apaclla Nalvarte  
**MIEMBRO**

## **DEDICATORIA**

A mi madre en el cielo Santa Montes Condor por su enorme amor y sacrificio, por su incondicional apoyo y por los valores que me ha inculcado en el transcurso de mi vida y que desde el cielo aun me sigue acompañando en el día a día.

A mi tío en el cielo Alberto M. Montes Condor por inculcar en mí el amor por el estudio y el conocimiento y estar a mi lado desde mis primeros pasos.

A mi padre Evaristo Condezo Cajachagua que está a mi lado, por los consejos y palabras de aliento por ser cada vez una mejor persona.

A mis hijos Valeria, Leonardo y Adrian a mi esposa Heiser Paola por su incondicional apoyo y ser la fuente amor e inspiración.

A mis hermanos Rosario y Dennis, porque todo es posible en este mundo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar un especial agradecimiento al Ph.D. Eusebio Ingol Blanco por su constante apoyo, consejos significativos, dirección y entera colaboración para el término de la presente tesis.

A los profesores de mi Alma Mater E.A.P Ingeniería Mecánica de Fluidos de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, en especial al ing. José Juarez Céspedes por inculcar en mi la pasión por la hidráulica e hidrología.

# ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
2.1	MODELACIÓN ESTOCÁSTICA .....	5
2.2	ANÁLISIS DE DATOS.....	6
2.2.1	Estadísticas básicas.....	6
a.	Datos anuales.....	6
b.	Datos estacionales .....	7
2.2.2	Estadísticas relacionadas con el Almacenamiento, Sequia y excedentes.....	8
a.	Estadísticas relacionadas con el Almacenamiento .....	8
b.	Estadísticas relacionadas con la Sequia.....	10
c.	Estadísticas relacionadas con los Excedentes.....	10
2.3	MODELOS MATEMÁTICOS.....	11
2.3.1	Transformaciones y Estandarización de datos.....	11
2.3.2	Modelo autoregresivo de media móvil (ARMA) .....	11
2.3.3	Modelo Autoregresivo de Media Móvil Periodico (PARMA).....	13
2.3.4	Generando Series Sintéticas .....	14
2.3.5	Pruebas de Modelos.....	15
a.	Criterio de información de Akaike para modelos ARMA y PARMA .....	15
b.	Prueba de propiedades de los procesos .....	16
2.4	ACUÍFEROS .....	16
2.5	PARÁMETROS HIDROGEOLOGÍCOS .....	18
2.5.1	Porosidad .....	18
2.5.2	Permeabilidad o conductividad hidráulica .....	19
2.5.3	Transmisividad .....	20
2.5.4	Coficiente de almacenamiento.....	20
2.6	ECUACIONES FUNDAMENTALES DEL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	21
2.6.1	La Ley de Darcy .....	21
2.6.2	Ecuación de continuidad.....	24
2.6.3	Ecuaciones generales del flujo subterráneo.....	25
2.6.4	Resolución de la ecuación general del flujo .....	26

2.7	MODELIZACIÓN MATEMÁTICA CON VISUAL MODFLOW .....	28
2.8	GESTIÓN DE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA .....	29
2.8.1	Definición y periodo básico.....	29
2.8.2	Modelo de Planificación y Evaluación WEAP (Water Evaluation and Planning System).....	29
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	30
3.1.1	Proyecto Especial Chavimochic .....	30
a.	Cuenca del rio Santa.....	30
b.	Cuenca del rio Chao .....	31
c.	Cuenca del rio Virú .....	32
d.	Cuenca del rio Moche.....	32
e.	Cuenca del rio Chicama.....	33
3.1.2	Proyecto Especial Chinecas.....	34
a.	Cuenca del rio Nepeña.....	34
b.	Cuenca del rio Casma - Sechin.....	35
3.2	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL .....	37
3.3.1	Proyecto Especial Chavimochic .....	37
3.3.2	Proyecto Especial Chinecas.....	38
3.3	MATERIALES.....	39
3.3.1	Información de la data hidrométrica.....	39
3.3.2	Información del acuífero de Chao .....	40
3.3.3	Información de estudios anteriores.....	41
3.3.4	Programas .....	41
3.4	METODOLOGÍA.....	42
3.4.1	Análisis y tratamiento de la información hidrométrica .....	43
a.	Análisis exploratorio de datos .....	43
b.	Homogenización de Estaciones Método del Vector Regional .....	43
c.	Análisis Estadístico de Saltos y Tendencias.....	44
d.	Completación de datos Hidrometeorológicos.....	44
3.4.1	Modelo de simulación estocástica .....	45
a.	Análisis de datos.....	46
b.	Modelos para series de tiempo .....	46

c.	Generación de series sintéticas .....	47
d.	Clasificación de escurrimientos sintéticos mensuales .....	47
3.4.2	Simulación Numérica del acuífero de Chao .....	48
a.	Caracterización del sistema natural .....	49
b.	Construcción del modelo conceptual .....	49
c.	Construcción del modelo matemático .....	49
d.	Calibración del modelo de flujo .....	50
e.	Escenarios de manejo del acuífero .....	50
3.4.3	Evaluación de la demanda .....	50
a.	Proyecto Especial Chinecas .....	51
b.	Proyecto Especial Chavimochic .....	55
3.4.4	Parámetros de Comparación .....	59
3.4.5	Simulación de los sistemas de recursos hídricos .....	60
a.	Calibración del escenario actual .....	63
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	66
4.1	ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA .....	66
4.1.1	Análisis exploratorio de datos .....	66
4.1.2	Homogenización de Estaciones Método del Vector Regional .....	68
4.1.3	Análisis Estadístico de Saltos y tendencias .....	70
4.1.4	Completación de datos hidrometeorológicos .....	72
4.2	MODELO DE SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA .....	73
4.2.1	Análisis de datos .....	73
b.	Normalización .....	75
c.	Estadísticas básicas de las series .....	76
d.	Estadísticas de almacenamiento, sequía y superávit de las series .....	77
e.	Estandarización de la serie transformada .....	78
4.2.2	Modelos para series de tiempo .....	79
a.	Modelo autoregresivo de media móvil (ARMA) .....	79
b.	Modelo autoregresivo de media móvil periódico (PARMA) .....	80
4.2.3	Generación de series sintéticas .....	81
a.	Series sintéticas anuales .....	81
b.	Series sintéticas mensuales .....	82
4.2.4	Clasificación de escurrimientos sintéticos mensuales .....	84

4.3	SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ACUÍFERO DE CHAO .....	89
4.3.1	Construcción del modelo conceptual.....	89
a.	Dominio del sistema .....	89
b.	Capas del acuífero .....	91
c.	Entradas y salidas del agua del sistema .....	91
4.3.2	Construcción del modelo matemático .....	92
a.	Discretización espacial: diseño de la malla del modelo .....	93
b.	Discretización temporal: paso de tiempo.....	94
c.	Asignación de propiedades al acuífero .....	94
d.	Asignación de las condiciones de borde.....	96
4.3.3	Calibración del modelo de flujo .....	99
a.	Condiciones de ejecución del modelo de flujo.....	99
b.	Método de calibración del modelo de flujo.....	100
c.	Régimen de simulación de flujo .....	100
d.	Análisis de la calibración.....	101
4.3.4	Escenarios de manejo del acuífero .....	107
a.	Escenario 1: Situación actual.....	108
b.	Escenario 2: Ampliación – áreas nuevas .....	109
c.	Escenario 3: Factibilidad .....	111
d.	Escenario 4: Incremento de caudal de bombeo a 50.0 Hm3 .....	112
e.	Escenario 5: Solo agua subterránea .....	114
4.4	SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS .....	115
4.4.1	Escenario 1 .....	115
a.	Calibración del modelo.....	118
4.4.2	Escenario 2 .....	120
4.4.3	Escenario 3 .....	121
4.4.4	Análisis de implementación de infraestructura de regulación.....	124
4.4.5	Escenario 4 .....	125
a.	Gestión de las demandas.....	132
4.4.6	Escenario 5 .....	139
a.	Gestión de las demandas.....	145
4.4.7	Resumen de resultados de los escenarios .....	150
4.5	DISCUSIÓN.....	153
4.6	PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	156

V. CONCLUSIONES.....	158
VI. RECOMENDACIONES .....	160
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	161
VIII.ANEXOS .....	165

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Magnitudes de K para diferentes materiales.....	20
Cuadro 2: Ventajas y desventajas de los métodos numéricos de resolución de la ecuación de flujo.....	27
Cuadro 3: Red de Estaciones Hidrométricas .....	40
Cuadro 4: Eficiencias de riego actual en las áreas del valle viejo.....	51
Cuadro 5: Eficiencias de riego en las áreas a mejorar.....	52
Cuadro 6: Eficiencias de riego en las áreas nuevas de incorporación.....	52
Cuadro 7: Demanda actual Chinecas en Hm <sup>3</sup> .....	53
Cuadro 8: Demanda Futura Chinecas en Hm <sup>3</sup> .....	54
Cuadro 9: Eficiencia de riego actual de los valles Chao, Virú y Moche.....	55
Cuadro 10: Eficiencia de riego futuro de los valles Chao, Virú y Moche.....	56
Cuadro 11: Demanda actual Chavimochic en Hm <sup>3</sup> .....	57
Cuadro 12: Demanda Futura Chavimochic en Hm <sup>3</sup> .....	58
Cuadro 13: Estación de control salida de Desarenador mira Limnimetrica Km 3+312, canal Irchim .....	64
Cuadro 14: Estación de control hidrométrico 40+100, canal Carlos Leight.....	64
Cuadro 15: Estación de control hidrométrico salida de embalse de compensación horaria Palito Redondo, canal Madre .....	64
Cuadro 16: Escenarios de simulación de los recursos hídricos.....	65
Cuadro 17: Región 01, caudales anuales MVR.....	69
Cuadro 18: Región 02, caudales anuales MVR.....	69
Cuadro 19: Análisis estadístico de consistencia Región 01 .....	71
Cuadro 20: Análisis estadístico de consistencia Región 02 .....	72
Cuadro 21: Estaciones con dato mensual faltante .....	73
Cuadro 22: Resumen de la normalización de las series anuales y mensuales de la estación Condorcerro con la función logarítmica y gama .....	75
Cuadro 23: Estadísticas básicas serie histórica anual y mensual estación Condorcerro en Hm <sup>3</sup> .....	76
Cuadro 24: Estadísticas básicas serie transformada anual y mensual estación Condorcerro .....	76
Cuadro 25: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones anuales originales de la estación Condorcerro .....	77

Cuadro 26: Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones mensuales originales de la estación Condorcerro.....	77
Cuadro 27: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos ARMA – Estación Condorcerro .....	79
Cuadro 28: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – estación Condorcerro.....	80
Cuadro 29: Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Anual y la Serie Sintética Anual Generada – Aportaciones de la estación Condorcerro.....	82
Cuadro 30: Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Condorcerro en m <sup>3</sup> /s.....	82
Cuadro 31: Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación Condorcerro en m <sup>3</sup> /s.....	83
Cuadro 32: Análisis estadístico de Series Sintéticas para su uso en el modelo de planeación, Estación Condorcerro.....	85
Cuadro 33: Secuencias seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Condorcerro .....	86
Cuadro 34: Datos de entrada y salida del balance de masa en régimen estacionario.....	105
Cuadro 35: Datos de entrada y salida del balance de masa en régimen transitorio.....	106
Cuadro 36: Escala de tiempo en régimen transitorio.....	107
Cuadro 37: Escenarios de simulación.....	108
Cuadro 38: Balance de agua subterránea Escenario 1 .....	108
Cuadro 39: Balance de agua subterránea Escenario 2.....	110
Cuadro 40: Balance de agua subterránea Escenario 3.....	111
Cuadro 41: Balance de agua subterránea Escenario 4.....	113
Cuadro 42: Balance de agua subterránea Escenario 5.....	114
Cuadro 43: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal.....	116
Cuadro 44: Estadísticas de correspondencia entre el caudal observado y caudal simulado Canal Irchim – salida de desarenador.....	118
Cuadro 45: Estadísticas de correspondencia entre el caudal observado y caudal simulado Canal Carlos Leight.....	118
Cuadro 46: Estadísticas de correspondencia entre el caudal observado y caudal simulado Canal Madre, salida de embalse de compensación horaria .....	119
Cuadro 47: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal.....	120

Cuadro 48: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal.....	123
Cuadro 49: Ajuste de los valores de capacidad de almacenamiento a una función de probabilidad normal.....	124
Cuadro 50: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca .....	127
Cuadro 51: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca .....	128
Cuadro 52: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal.....	129
Cuadro 53: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica húmeda.....	130
Cuadro 54: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy húmeda ..	131
Cuadro 55: Valores de Prioridades Propuestas inicialmente y de gestión .....	132
Cuadro 56: “Acción 1” Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca .....	133
Cuadro 57: “Acción 1” Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca...	134
Cuadro 58: “Acción 2” Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca .....	135
Cuadro 59: “Acción 2” Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca...	136
Cuadro 60: Resumen de los valores Confiabilidad para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, para diferentes condiciones hidrológicas y diferentes formas de gestión .....	137
Cuadro 61: Comparativo del almacenamiento en los reservorios Cascajal y Palo Redondo .....	137
Cuadro 62: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca .....	140
Cuadro 63: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca .....	141

Cuadro 64: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal.....	142
Cuadro 65: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica húmeda.....	143
Cuadro 66: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy húmeda ..	144
Cuadro 67: Valores de Prioridades Propuestas iniciales y de gestión.....	145
Cuadro 68: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca .....	146
Cuadro 69: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca .....	147
Cuadro 70: Resumen de los valores Confiabilidad para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, para diferentes condiciones hidrológicas y diferentes formas de gestión .....	148
Cuadro 71: Comparativo del almacenamiento en los reservorios Cascajal y Palo Redondo .....	148
Cuadro 72: Resumen de escenarios de simulación de los recursos hídricos.....	152
Cuadro 73: Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Chorobal - Huamanzaña m <sup>3</sup> /s .....	165
Cuadro 74: Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Huacapongo – Sifón Viru en m <sup>3</sup> /s .....	165
Cuadro 75: Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Quirihuac – Moche m <sup>3</sup> /s .....	166
Cuadro 76: Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Salinar - Tambo en m <sup>3</sup> /s .....	166
Cuadro 77: Estadísticas básicas serie histórica mensual estación San Jacinto en m <sup>3</sup> /s ....	166
Cuadro 78: Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Sector Tutuma en m <sup>3</sup> /s	167
Cuadro 79: Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Puente Quillo en m <sup>3</sup> /s	167
Cuadro 80: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Estación Chorobal - Huamanzaña .....	168
Cuadro 81: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Estación Huacapongo - Sifón Virú.....	168
Cuadro 82: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Estación Quirihuac – Moche .....	169

Cuadro 83: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Estación Salinar – Tambo.....	169
Cuadro 84: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Estación San Jacinto.....	169
Cuadro 85: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Estación Sector Tutuma .....	170
Cuadro 86: Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Estación Puente Quillo .....	170
Cuadro 87: Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación Chorobal - Huamanzaña en m <sup>3</sup> /s.....	171
Cuadro 88: Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación Huacapongo – Sifón Virú en m <sup>3</sup> /s .....	171
Cuadro 89: Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación Quirihuac – Moche en m <sup>3</sup> /s .....	172
Cuadro 90: Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación Salinar – Tambo en m <sup>3</sup> /s.....	172
Cuadro 91: Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación San Jacinto en m <sup>3</sup> /s .....	173
Cuadro 92: Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación Sector Tutuma en m <sup>3</sup> /s.....	173
Cuadro 93: Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación Puente Quillo en m <sup>3</sup> /s .....	174
Cuadro 94: Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Chorobal - Huamanzaña .....	174
Cuadro 95: Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Hacapongo - Sifón Virú.....	174
Cuadro 96: Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Quirihuac Moche .....	175
Cuadro 97: Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Salinar – Tambo.....	175
Cuadro 98: Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación San Jacinto .....	175
Cuadro 99: Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Sector Tutuma.....	175

Cuadro 100: Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Puente Quillo .....	176
Cuadro 101: Distribución de los Tipos de Pozos Valle Chao - 1998.....	177
Cuadro 102: Distribución de Los Pozos Según Su Estado Valle Chao 1998.....	177
Cuadro 103: Profundidades Actuales Máximas y Mínimas Según El Tipo de Pozo Por Distrito Político Valle Chao 1998 .....	177
Cuadro 104: Volumen de Explotación de las Aguas Subterráneas en el Valle Chao 1981 .....	178
Cuadro 105: Volumen de Explotación de Las Aguas Subterráneas en el Valle Chao 1989 .....	178
Cuadro 106: Volumen de Explotación Anual (m3) Según Uso en el Valle Chao 1998....	178
Cuadro 107: Características de Los Afloramientos de Aguas Subterráneas Valle Chao 1998 .....	179
Cuadro 108: Características de La Morfología de La Napa diciembre 1997 y mayo de 1998-Valle Chao.....	180
Cuadro 109: Profundidad de la Napa Valle de Chao 1998.....	180
Cuadro 110: Resultados de las Pruebas de Bombeo Valle Chao 1998 .....	181
Cuadro 111: Radios de Influencia a Diferentes Tiempos de Bombeo Valle Chao 1998 ..	181
Cuadro 112: Conductividades Eléctricas Valle Chao 1998.....	181
Cuadro 113: Estimación del volumen no explotable, acuífero Chao 2007 .....	182
Cuadro 114: Conductividad hidráulica insertada en el modelo Modflow.....	183
Cuadro 115: Almacenamiento específico, rendimiento específico, porosidad efectiva y porosidad total insertada en el modelo Modflow. ....	184
Cuadro 116: Evapotranspiración insertada en el modelo Modflow. ....	184
Cuadro 117: Explotación actual de agua subterránea Chavimochic en Hm3.....	190
Cuadro 118: Explotación futura de agua subterránea Chavimochic en Hm3.....	190
Cuadro 119: Explotación futura con incremento de agua subterránea Chavimochic en Hm3 .....	191
Cuadro 120: Explotación actual de agua subterránea Chinecas en Hm3 .....	191
Cuadro 121: Explotación futura de agua subterránea Chinecas en Hm3 .....	191

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de acuíferos. ....	18
Figura 2: Experimento de Darcy. ....	22
Figura 3: Elemento diferencial de volumen para la deducción de la ecuación de continuidad. ....	24
Figura 4: Sistema Chavimochic, Santa y Chinecas. ....	36
Figura 5: Proceso metodológico para el Análisis de Sistemas de Recursos Hídricos. ....	42
Figura 6: Proceso metodológico para simulación estocástica. ....	45
Figura 7: Proceso metodológico para simulación del acuífero de Chao. ....	48
Figura 8: Diagrama de cajas de caudales mensuales de las estaciones hidrométricas. ....	67
Figura 9: Índices anuales del Vector 01. ....	69
Figura 10: Índices anuales del Vector 02. ....	70
Figura 11: Aportaciones anuales históricas de la estación Condorcerro $\text{Hm}^3$ .....	74
Figura 12: Aportaciones mensuales históricas de la estación Condorcerro $\text{m}^3/\text{s}$ . ....	74
Figura 13: Estandarización de la serie anual y mensual.....	78
Figura 14: Comparación estadística de escurrimientos mensuales sintéticos e históricos. .	83
Figura 15: Distribución de probabilidad del escurrimiento medio anual de las 1,000 series. ....	85
Figura 16: Función de probabilidad del escurrimiento medio anual de las 1,000 series.....	86
Figura 17: Escurrimientos sintéticos; Serie. #711, Media=122 $\text{m}^3/\text{s}$ , $F(Q < X) = 0.035\%$ . 87	
Figura 18: Escurrimientos sintéticos; Serie. #290, Media=130 $\text{m}^3/\text{s}$ , $F(Q < X) = 3.85\%$ ... 87	
Figura 19: Escurrimientos sintéticos; Serie. #107, Media=142 $\text{m}^3/\text{s}$ , $F(Q < X) = 74.2\%$ ... 88	
Figura 20: Escurrimientos sintéticos; Serie. #567, Media=154 $\text{m}^3/\text{s}$ , $F(Q < X) = 98\%$ ..... 88	
Figura 21: Escurrimientos sintéticos; Serie. #776, Media=158 $\text{m}^3/\text{s}$ , $F(Q < X) = 99\%$ ..... 89	
Figura 22: Esquema de zona seleccionada. ....	90
Figura 23: Modelo Conceptual del acuífero de Chao.....	92
Figura 24: Mallado de la zona de estudio (190 columnas x 200 filas).....	93
Figura 25: Conductividad hidráulica. ....	95
Figura 26: Almacenamiento. ....	95
Figura 27: Condiciones de frontera. ....	98
Figura 28: Representación y ajuste de datos calculados frente a datos observados en régimen estacionario.....	102

Figura 29: Representación y ajuste de datos calculados frente a datos observados en régimen transitorio.....	103
Figura 30: Representación y ajuste de datos calculados frente a datos observados en régimen transitorio.....	104
Figura 31: Representación del balance de masa en régimen estacionario.....	105
Figura 32: Representación del balance de masa en régimen transitorio.....	106
Figura 33: Hidrograma de pozos Escenario 1. ....	109
Figura 34: Hidrograma de pozos Escenario 2. ....	110
Figura 35: Hidrograma de pozos Escenario 3 ....	112
Figura 36: Hidrograma de pozos Escenario 4. ....	113
Figura 37: Hidrograma de pozos Escenario 5. ....	115
Figura 38: Criterio de desempeño condición hidrológica normal. ....	116
Figura 39: Esquema del área de estudio modelo WEAP, escenario 1.....	117
Figura 40: Caudal observado Caudal simulado Canal Irchim – salida de desarenador ...	118
Figura 41: Caudal observado Caudal simulado canal Carlos Leight.....	119
Figura 42: Caudal observado Caudal simulado Canal Madre, salida de embalse de compensación horaria.....	119
Figura 43: Criterios de desempeño condición hidrológica normal.....	121
Figura 44: Esquema del área de estudio modelo WEAP, escenario 2 y 3.....	122
Figura 45: Criterios de desempeño condición hidrológica normal.....	123
Figura 46: Función de probabilidad para los valores de capacidad de almacenamiento...	125
Figura 47: Esquema del área de estudio modelo WEAP, escenario 4 y 5.....	126
Figura 48: Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.....	127
Figura 49: Criterios de desempeño condición hidrológica seca. ....	128
Figura 50: Criterios de desempeño condición hidrológica normal.....	129
Figura 51: Criterios de desempeño condición hidrológica húmeda. ....	130
Figura 52: Criterios de desempeño condición hidrológica muy húmeda .....	131
Figura 53: Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.....	133
Figura 54: Criterios de desempeño condición hidrológica seca. ....	134
Figura 55: Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.....	135
Figura 56: Criterios de desempeño condición hidrológica seca. ....	136
Figura 57: Volumen y zonas de almacenamiento Embalse Cascajal. ....	138
Figura 58: Volumen y zonas de almacenamiento Embalse Palo Redondo. ....	138
Figura 59: Volumen de almacenamiento Embalse Cascajal y Palo Redondo. ....	139

Figura 60: Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.....	140
Figura 61: Criterios de desempeño condición hidrológica seca.....	141
Figura 62: Criterios de desempeño condición hidrológica normal.....	142
Figura 63: Criterios de desempeño condición hidrológica húmeda. ....	143
Figura 64: Criterios de desempeño condición hidrológica muy húmeda. ....	144
Figura 65: Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.....	146
Figura 66: Criterios de desempeño condición hidrológica seca.....	147
Figura 67: Volumen y zonas de almacenamiento Embalse Cascajal .....	149
Figura 68: Volumen y zonas de almacenamiento Embalse Palo Redondo. ....	149
Figura 69: Volumen de almacenamiento Embalse Cascajal y Palo Redondo.....	150
Figura 70: Isoprofundidad de la napa freática Escenario 1. ....	185
Figura 71: Isoprofundidad de la napa freática Escenario 2. ....	186
Figura 72: Isoprofundidad de la napa freática Escenario 3. ....	187
Figura 73: Isoprofundidad de la napa freática Escenario 4. ....	188
Figura 74: Isoprofundidad de la napa freática Escenario 5. ....	189

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis de Datos Estadísticos .....	165
Anexo 2: Simulación Estocástica .....	168
Anexo 3: Caracterización del sistema natural del Valle de Chao.....	176
Anexo 4: Oferta de agua subterránea .....	190

## **RESUMEN**

La cuenca del río Santa ubicada en la zona centro norte de la costa peruana tiene gran importancia por sus abastecimientos urbanos, agrícolas e hidroeléctricos a través de los proyectos de irrigación: Proyecto especial Chavimochic en la Libertad y el Proyecto Especial Chinecas en Ancash. Los antecedentes muestran que los acuíferos de ambos proyectos se encuentran subexplotados, al presentarse niveles freáticos altos en la parte baja de los valles, originando problemas de salinidad y degradación de suelo. La ausencia de regulación hace necesario una planificación y gestión de acciones futuras, de tal manera de enfrentar sobre todo las épocas de sequía. Dada esta situación se ha planteado investigar y aplicar metodologías para el análisis de sistemas de recursos hídricos, para lo cual se ha recurrido a la modelación estocástica para la síntesis de aportaciones y la simulación predictiva de los acuíferos y al modelamiento de la gestión bajo condiciones hidrológicas futuras. Se ha explorado profundamente las técnicas de análisis estadísticos más habituales en la bibliografía, además se ha realizado comparaciones entre modelos que toman en cuenta la estacionalidad en el año hidrológico y otros modelos que no lo hacen. El objetivo principal es evaluar recursos hídricos de los proyectos Especiales Chavimochic y Chinecas para la planificación futura del agua, para tal efecto se recurrirá a la modelación estocástica para la predicción de las aportaciones, la simulación predictiva del acuífero y al modelamiento de la gestión del agua bajo condiciones hidrológicas actuales y futuras. Se desarrolló la simulación numérica de flujo subterráneo del acuífero del Valle de Chao, para analizar diferentes alternativas de explotación que garanticen el equilibrio entre la recarga y la descarga del acuífero para lograr su sostenibilidad. Los resultados muestran la necesidad de planificar infraestructuras de regulación y reglas de operación futura, con los cuales pudo evidenciarse que la confiabilidad en la satisfacción de las demandas futuras mejoro considerablemente, reduciendo la vulnerabilidad del sistema.

**PALABRAS CLAVE:** Simulación, Acuíferos, Modelación Estocástica, Planificación, Gestión.

## **ABSTRACT**

The Santa River basin, located in the northern center of the Peruvian coast, has great importance for its urban, agricultural and hydroelectric supplies through irrigation projects: Chavimochic in La Libertad and Chincas in Ancash. The background shows that both projects, aquifers are underexploited because of water table is high in the lower basin, causing salinity and soil degradation problems. Because of lack of regulation, it is necessary the planning and management of future actions, so to face especially during droughts periods. Given this situation has arisen investigate and implement methodologies for analyzing water resource systems, for which it has used the stochastic modeling for the synthesis of input and predictive simulation of aquifers and modeling management under future hydrological conditions. It has deeply explored the techniques common in the literature statistical analyzes, and has made comparisons between models that take into account the seasonality in the hydrological year and other models do not. The main objective is to evaluate the water resources available for the especial projects Chavimochic and Chincas for that effect we are going to use stochastic modeling for the prediction of discharges, the simulation of the aquifer and the management of the water under present and future hydrological conditions. We develop the numerical simulation of subterranean flux of the aquifer on the Chao Valley to analyze the different alternatives of mining that guarantee the reload and discharge equilibrium of the aquifer for sustainability. The simulation results show the need to plan infrastructure regulation and future operation rules, with which, it could be shown that the reliability in meeting future demands improved considerably, reducing the vulnerability of the system.

**KEYWORDS:** Simulation, Aquifer, Stochastic Modeling, Planning, Management.

## I. INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico se encuentra bajo presión creciente debido al incremento de la población, las actividades económicas y la mayor competencia entre usuarios. Además, la contaminación del agua agudiza aún más esta situación, provocando que exista escasez del recurso.

Es evidente que un mayor desarrollo implica un impacto sobre los recursos hídricos, además los potenciales efectos del cambio climático, así como lo indica la investigación “Escenarios Climáticos en la Cuenca del río Santa para el año 2030”, en donde concluye que la temperatura máxima y mínima se incrementaría hasta en 0.55 °C en la cuenca, estacionalmente las lluvias se estarían incrementando en la cuenca alta hasta en un 15% en otoño, las lluvias más fuertes estarían disminuyendo en intensidad hacia el 2030 y las temperaturas más intensas, incrementándose, pues las noches y días serían más cálidos hacia el 2030 (SENAMHI 2009).

La cuenca del río Santa ubicada en la zona centro norte de la costa peruana tiene gran importancia por sus abastecimientos urbanos, agrícolas e hidroeléctricos. Sin embargo, adolece de infraestructura de regulación (reservorio) para los dos proyectos de irrigación en la costa, Proyecto especial Chavimochic en la Libertad y el Proyecto Especial Chincas en Ancash.

Por otro lado, los antecedentes muestran que los acuíferos de ambos proyectos se encuentran subexplotados, al presentarse niveles freáticos altos en la parte baja de los valles, originando problemas de salinidad y degradación de suelos, según los estudios Hidrogeológicos realizados por La Autoridad Nacional del Agua, por lo que es necesario encontrar la estrategia más conveniente para incrementar las extracciones, en consecuencia, reducir el nivel freático.

Los Proyectos Especiales de irrigación costeros Chavimochic y Chincas, que aún no llegan a culminar su ejecución de infraestructura y cubrir al cien por ciento las áreas destinadas para riego, comienzan a presentar problemas de déficit para cubrir sus demandas hídricas (P.E. Chavimochic 2012).

Por otro lado, en cuencas hidrográficas de la costa peruana existe la necesidad de una gestión y planificación hídrica, debido al constante crecimiento de la población que demandara más recursos hídricos para nuevos servicios de agua potable, actividades productivas, actividades agrícolas, etc.

En esta dirección, es de gran necesidad e importancia la planificación y gestión de acciones futuras, que incluya estrategias y políticas de operación de los sistemas de recursos hídricos para en enfrentar sobre todo las épocas de sequía o déficit hídricos.

Para dar respuesta a esta problemática, la presente investigación plantea las siguientes interrogantes:

¿Qué metodologías pueden ser usadas y adaptadas para determinar las aportaciones de caudales en los ríos para un escenario futuro?

¿Cuál es la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales?

¿Cuál es la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos?

¿Cuáles son las áreas de recarga, tránsito y descarga del acuífero Chao?

¿En el supuesto caso de incumplimiento para cubrir las demandas es posible la implementación de embalses con la capacidad máxima para una plena satisfacción de estas?

¿Cómo podemos evaluar los sistemas de recursos hídricos complejos para desarrollar una correcta planificación y gestión de las aguas superficiales y subterráneas para atender con garantías las futuras demandas?

¿Qué tipo de estrategias pueden ser implementadas para mejorar la gestión del agua en los ámbitos de estudio?

El Proyecto Especial Chavimochic y el Proyecto Especial Chinecas tienen como finalidad entre otros aspectos satisfacer las demandas de agua para riego y la población, es por ello la necesidad de construir presas para almacenamiento de agua y la explotación de los pozos de bombeo de tal manera que pueda aprovecharse al máximo los recursos hidráulicos superficiales y subterráneos en estas regiones.

La mala planeación de la explotación de los acuíferos ha provocado que año con año los niveles piezométricos aumenten preocupantemente en la parte baja de los valles, haciendo evidente la subexplotación, poniendo en peligro a las áreas de riego con la salinización de suelos, por lo que es indispensable analizar alternativas de explotación que garantice el equilibrio entre la recarga y la descarga del acuífero. Si bien se ha modelado el comportamiento del acuífero en otros estudios realizados, no se han empleado estos modelos para predecir el funcionamiento del mismo bajo escenarios de explotación que garanticen su equilibrio.

Durante la explotación de los sistemas de recursos hídricos, pueden darse inevitablemente situaciones en las que no sea posible suministrar de forma satisfactoria los usos establecidos, esta situación puede minimizarse mediante una anticipación de la sequía o déficit hídrico en el sistema en las fases de planificación y explotación, minimizando los valores esperados de duración y magnitud de sequías, mediante la adopción de reglas de gestión.

De esta manera la información obtenida a través de la modelación computacional permitirá establecer el comportamiento de la operación de los embalses en distintos escenarios durante la vida útil del proyecto.

Esta investigación intentara desarrollar reglas de gestión adecuadas entre la oferta y la demanda de agua para los próximos 50 años de vida útil del proyecto, con altos índices de garantía en las demandas. Para lo cual se recurrirá a la modelación estocástica para la síntesis de aportaciones y a la simulación predictiva de los acuíferos. Al modelo de simulación de los sistemas de recursos hídricos serán ingresadas las condiciones hidrológicas futuras.

### **Objetivo General**

El presente trabajo tiene como objetivo general:

“Desarrollar la evaluación de los sistemas de recursos hídricos de los proyectos Especiales Chavimochic y Chincas para la planificación futura del agua. Para tal efecto se recurrirá a la modelación estocástica para la predicción de las aportaciones, la simulación predictiva del acuífero y al modelamiento de la gestión del agua bajo condiciones hidrológicas actuales y futuras”

## **Objetivo Especifico**

- Desarrollar un análisis exploratorio de datos de caudales mensuales y elaborar una base de datos hidrométricos de calidad para poder generar caudales sintéticos mensuales y anuales para evaluación futura del proyecto.
- Analizar el comportamiento de los sistemas con el modelo estocástico que mejor se ajuste a las necesidades del proyecto y desarrollar comparaciones de los resultados con la información histórica.
- Proponer y evaluar el comportamiento operacional de embalses para diferentes condiciones hidrológicas, tales como: muy seco, seco, normal, húmedo, muy húmedo.
- Desarrollar el modelo hidrogeológico conceptual y la simulación numérica del flujo subterráneo del acuífero del Valle de Chao, para analizar diferentes alternativas de explotación que garanticen el equilibrio entre la recarga y la descarga del acuífero para lograr la estabilización del mismo.
- Diseñar y evaluar alternativas mediante la implementación de un modelo de planificación y gestión que evalúe los escenarios futuros de los sistemas.
- Proponer y evaluar medidas de gestión que asegure la satisfacción de demandas.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1 MODELACIÓN ESTOCÁSTICA

La simulación estocástica de series de tiempo de los recursos hídricos en general y series de tiempo hidrológicas en particular, se ha usado ampliamente durante varias décadas para varios problemas relacionados al planeamiento y dirección de sistemas de recursos hídricos. Un ejemplo típico es la determinación de la capacidad de un embalse, evaluando la fiabilidad del embalse de una capacidad dada, la evaluación de la suficiencia dará una estrategia de dirección de los recursos hídricos, bajo varios potenciales hidrológicos, y evaluar el performance de un sistema de irrigación bajo entregas de agua inciertas (Salas et al. 1980; Loucks et al. 1981).

Los modelos estocásticos de series de tiempo hidrológicas como el flujo de caudales esta típicamente basada en modelos matemáticos. El tipo de modelo usado para un caso particular depende de varios factores como, las características físicas y estadísticas del proceso bajo consideración, disponibilidad de datos, la complejidad del sistema, y el propósito global del estudio de simulación.

Dado el registro histórico, a uno le gustaría que el modelo reprodujera las estadísticas históricas. Esto es por qué un paso normal en los estudios de simulación de caudales es determinar las estadísticas históricas. Una vez seleccionado el modelo, el próximo paso es estimar los parámetros del modelo, para probar si el modelo representa bastante bien el proceso bajo consideración, y finalmente para llevar a cabo el estudio de simulación necesitado.

En la literatura existen varios modelos estocásticos que han sido utilizados en hidrología, entre los principales tenemos, modelos autoregresivos (AR), modelos de media móvil (MA), modelos mixtos autoregresivos de media móvil (ARMA), modelos mixtos autoregresivos de media móvil con parámetros periódicos (PARMA), modelos mixtos autoregresivos integrados de media móvil (ARIMA), modelos autoregresivos de media móvil con variable exógena (ARMAX), modelos de desagregación temporal y modelos de

desagregación espacial. Estos modelos pueden ser univariados (una sola serie temporal), multivariados (múltiples series temporales), estacionarios (propiedades estocásticas constantes en el tiempo) y no estacionarios (propiedades estocásticas variables en el tiempo) (Avilés 2011).

## 2.2 ANÁLISIS DE DATOS

Se denomina modelo estocástico o modelo de serie de tiempo en hidrología al modelo matemático que representa a un proceso estocástico (Aliaga 1982).

Las técnicas y procedimientos para estimar los modelos y sus parámetros desde los datos disponibles se denominan “modelamiento estocástico” de series hidrológicas o modelamiento de series de tiempo, lo cual constituye una de las herramientas básicas para la planificación y operación de sistemas de recursos de aguas en general (Salas de la Cruz 1979).

### 2.2.1 Estadísticas básicas

#### a. Datos anuales

Según Soveinsson et al. (2009), la media y la desviación estándar de una serie de tiempo  $y_t$  se estima por

$$\bar{y} = (1/N) \sum_{t=1}^N y_t \quad (2.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^2} \quad (2.2)$$

Respectivamente, donde N es el tamaño de la muestra. El coeficiente de variación se define como:  $cv = s / \bar{y}$  Igualmente, el coeficiente de asimetría se estima por

$$g = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \bar{y})^3}{s^3} \quad (2.3)$$

Los coeficientes de auto correlación  $r_k$  de una serie de tiempo pueden estimarse por

$$r_k = \frac{m_k}{m_0} \quad (2.4)$$

$$m_k = (1/N) \sum_{t=1}^{N-k} (y_{t+k} - \bar{y})(y_t - \bar{y}) \quad (2.5)$$

y k = desfase en el tiempo. Igualmente, para las series de múltiples lugares, la muestra de correlación cruzada de desfase k entre el lugar i y el lugar j, denotado por  $r_k^{ij}$ , puede estimarse mediante:

$$m_k^{ij} = \frac{m_k^{ij}}{(m_0^i m_0^j)^{1/2}} \quad (2.6)$$

$$m_k^{ij} = (1/N) \sum_{t=1}^{N-k} (y_{t+k}^{(i)} - \bar{y}^{(i)})(y_t^{(j)} - \bar{y}^{(j)}) \quad (2.7)$$

$m_0^i$  es la variación de la muestra para el sitio i.

### b. Datos estacionales

Según Soveinsson et al. (2009), las series de tiempo hidrológicas estacionales tales como los caudales mensuales, se caracterizan mejor por las estadísticas estacionales. Asumiendo que  $y_{v,\tau}$  es una serie de tiempo estacional donde v representa los años y  $\tau$  las estaciones.  $v = 1, \dots, N$  con N = número de años, y  $\tau = 1, \dots, \omega$ , y  $\omega =$  el número de estaciones. La media y la desviación estándar para la estación  $\tau$  pueden estimarse por

$$\bar{y}_\tau = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N y_{v,\tau} \quad (2.8)$$

$$s_\tau = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (y_{v,\tau} - \bar{y}_\tau)^2} \quad (2.9)$$

respectivamente. El coeficiente estacional de variación es  $cv_\tau = S_\tau / \bar{Y}_\tau$ . Similarmente el coeficiente de asimetría estacional es estimado por

$$g_\tau = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (y_{v,\tau} - \bar{y}_\tau)^3}{s_\tau^3} \quad (2.10)$$

El coeficiente de correlación ínter estacional de la muestra con desfase k puede estimarse por

$$r_{k,\tau} = \frac{m_{k,\tau}}{(m_{0,\tau} m_{0,\tau-k})^{1/2}} \quad (2.11)$$

$$m_{k,\tau} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N (y_{v,\tau} - \bar{y})(y_{v,\tau-k} - \bar{y}_{\tau-k}) \quad (2.12)$$

en la que  $m_{0,\tau}$  representa la variación de la muestra para la estación  $\tau$ . Igualmente, para las series de múltiples lugares el coeficiente de correlación cruzada de la muestra con desfase k entre el lugar i y el lugar j para la estación  $\tau$  puede ser estimado por

$$r_{k,\tau}^{ij} = \frac{m_{k,\tau}^{ij}}{(m_{0,\tau}^{ii} m_{0,\tau-k}^{jj})^{1/2}} \quad (2.13)$$

$$m_{k,\tau}^{ij} = \sum_{v=1}^N [y_{v,\tau}^{(i)} - \bar{y}_{\tau}^{(i)}][y_{v,\tau-k}^{(j)} - \bar{y}_{\tau-k}^{(j)}] \quad (2.14)$$

donde  $m_{0,\tau}^{ij}$  representa la varianza de la muestra para la estación  $\tau$ . y el lugar i

Note que en las ecuaciones (2.11) a (2.14) donde  $\tau - k < 1$  los términos  $v = 1$ ,

$Y_{v,\tau-k}, \bar{Y}_{v,\tau-k}, m_{o,\tau-k}, Y_{v,\tau-k}^{(j)}, \bar{Y}_{\tau-k}^{(j)}$ , y  $m_{o,\tau-k}^{ij}$  son reemplazados por  $v = 2$ ,  $Y_{v,\omega+\tau-k}, \bar{Y}_{v,\omega+\tau-k}, m_{o,\omega+\tau-k}, Y_{v-1,\omega+\tau-k}^{(j)}, \bar{Y}_{\omega+\tau-k}^{(j)}$  y  $m_{o,\omega+\tau-k}^{ij}$  respectivamente.

## 2.2.2 Estadísticas relacionadas con el Almacenamiento, Sequía y excedentes

### a. Estadísticas relacionadas con el Almacenamiento

Las estadísticas relacionadas con el almacenamiento son particularmente importantes al modelar series de tiempo para la simulación de sistemas de reservorio. Tales características son generalmente funciones de la estructura de la varianza y autocovarianza de una serie de tiempo. Considerando la serie de tiempo  $y_i, i = 1, \dots, N$  y un  $y_1, \dots, y_n$  de la submuestra, con  $n \leq N$ . Para la secuencia de sumas parciales, (Soveinsson et al. 2009).

$$S_i = S_{i+1} + (y_i - \bar{y}_n) \quad i = 1, \dots, n \quad (2.15)$$

donde  $S_0 = 0$  y  $\bar{y}_n$  es la media de la muestra  $y_1, \dots, y_n$  que es determinada por la ecuación (2.1). Entonces, el rango ajustado  $R_n^*$  y la reescala ajustada  $R_n^{**}$  pueden calcularse por

$$R_n^* = \max(S_0, S_1, \dots, S_n) - \min(S_0, S_1, \dots, S_n) \quad (2.16)$$

$$R_n^{**} = \frac{R_n^*}{S_n} \quad (2.17)$$

respectivamente, en el cual  $S_n$  es la desviación estándar de  $y_1, \dots, y_n$  que es determinado por la ecuación. (2.2). Igualmente, el coeficiente de Hurst para una serie de tiempo se estima por

$$K = \frac{\ln(R_n^{**})}{\ln(n/2)}, \quad n > 2 \quad (2.18)$$

El cálculo de la capacidad de almacenamiento está basado en el algoritmo de cresta secuencial (Loucks 1981) que es equivalente al método de la curva de masa de Rippl. El algoritmo, aplicado a las series de tiempo  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  se puede describir como sigue. Basado en  $y_i$ , y el nivel de demanda de, una nueva secuencia  $S'_i$  se puede determinar como

$$S'_i = \begin{cases} S'_{i-1} + d - y_i \\ 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

donde  $S'_0 = 0$  Entonces la capacidad de almacenamiento se obtiene como

$$S_c = \max[S'_1, \dots, S'_N] \quad (2.20)$$

Note que los algoritmos descritos en las ecuaciones (2.15) a (2.20) se aplican también a las series estacionales, en este caso la serie estacional subyacente  $y_{v,\tau}$  se denota simplemente como  $y_t$ .

### **b. Estadísticas relacionadas con la Sequia**

Según Soveinsson et al. (2009), las estadísticas relacionadas con las sequías también son importantes en la modelación de series de tiempo hidrológicas. Para la serie  $y_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  el nivel de demanda  $d$  puede definirse como  $\alpha \bar{y}$ ,  $0 < \alpha \leq 1$ .

Un déficit ocurre cuando el  $y_i < d$  durante uno o más años consecutivamente, mientras  $y_i > d$  nuevamente. Tal como un déficit puede definirse por su duración  $L$ , por su magnitud  $M$ , y por su intensidad  $I = M/L$ .

Se asume que ese déficit ocurre en una muestra hidrológica dada, entonces la duración máxima de déficit (sequía más larga o máxima longitud del run) está dada por

$$L^* = \max(L_1, \dots, L_m) - \min(L_1, \dots, L_m) \quad (2.21)$$

y la máxima magnitud del déficit (máxima suma del run) está definida por

$$M^* = \max(M_1, \dots, M_m) \quad (2.22)$$

En SAMS, la duración de la sequía más larga y la magnitud deficitaria máxima son estimadas por ambas series, las anuales y las estacionales.

### **c. Estadísticas relacionadas con los Excedentes**

Para nuestro propósito aquí, las estadísticas relacionadas con las excedencias son simplemente lo opuesto a las estadísticas relacionadas con las sequías.

Considerando el mismo nivel del umbral  $d$ , ocurre un excedente cuando el  $y_i > d$  consecutivamente hasta que  $y_i < d$  nuevamente. Entonces, asumiendo que  $m$  excedentes ocurren durante un lapso de tiempo  $N$ , el máximo período de excedente  $L^*$  y la máxima magnitud del excedente  $M^*$  puede determinarse también de las ecuaciones (2.21) y (2.22), (Soveinsson et al. 2009).

## 2.3 MODELOS MATEMÁTICOS

### 2.3.1 Transformaciones y Estandarización de datos

Según Soveinsson et al. (2009), en casos donde los test de normalidad indiquen que las series observadas no están normalmente distribuidas, los datos tienen que ser transformados en normales antes de aplicar los modelos. Para normalizar los datos, en SAMS están disponibles las siguientes transformaciones:

- La transformación logarítmica: 
$$Y = \ln(X + a) \quad (2.23)$$

- La transformación exponencial: 
$$Y = (X + a)^b \quad (2.24)$$

- La transformación Box-Cox: 
$$Y = \frac{(X + a)^b - 1}{b}, \quad b \neq 0 \quad (2.25)$$

Donde Y es la serie normalizada, X es la serie original observada, y a y b son los coeficientes de la transformación. Nótese que la transformación logarítmica es simplemente la forma limitada de la transformación Box-Cox cuando el coeficiente b se aproxima a cero. También, la transformación exponencial es una forma desplazada y escalada de la transformación Box-Cox. Las variables Y e X pueden representar los datos anuales o estacionales. Para los datos estacionales a y b pueden escogerse para variar con la estación. Los datos normalizados pueden luego ser estandarizados substrayendo la media y dividiendo por la desviación estándar (la estandarización realmente es una opción en SAMS) (Soveinsson et al. 2009).

### 2.3.2 Modelo autorregresivo de media móvil (ARMA)

Los modelos autorregresivos han sido satisfactoriamente aplicados en el modelamiento de series de tiempo hidrológicas. Los bajos flujos en estaciones secas resultan principalmente de aporte subterráneo. Estos tienen relativamente poca variación. Durante la recesión, los flujos en un tiempo particular son una fracción de flujo del tiempo previo, pudiendo ser representado por un esquema autorregresivo. Los flujos altos están formados principalmente por grandes precipitaciones o deshielos, o ambos. Este comportamiento mixto puede ser modelado adicionando una componente media móvil (MA) a una componente autorregresiva (AR). Más específicamente, considerando la descarga superficial y el aporte subterráneo para una escala de tiempo anual, y usando la ecuación de balance de masa para el almacenamiento subterráneo, la descarga anual puede

representarse por un proceso mixto autorregresivo y media móvil (ARMA). Cabe indicar que los modelos ARMA pueden contar con menor número de parámetros que los estimados para un modelo autorregresivo de alto orden (Salas de la Cruz 1979).

El modelo ARMA (p,q) puede expresarse como:

$$\phi(B)Y_t = \theta(B)e_t \quad (2.26)$$

Donde  $Y_t$  representa el proceso de flujo para el año t, este es normalmente distribuido con media cero y varianza  $\sigma^2(Y)$ ,  $e_t$  es el término de ruido correlacionado con media cero y varianza  $\sigma^2(e)$  y también está normalmente distribuido; y  $\phi(B)$  y  $\theta(B)$  son los polinomiales en B definidos como:

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p \quad (2.27)$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad (2.28)$$

Donde  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$  son los parámetros autorregresivos.  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$  son los parámetros de la media móvil; B es el operador de desplazamiento hacia atrás, por ejemplo  $B^c Y_t = Y_{t-c}$ , es decir, p y q definen el orden del modelo ARMA.

El método de momentos (MOM) se puede usar en la estimación de los parámetros del modelo ARMA (p, q). Sin embargo, el método de los Mínimos cuadrados (LS) generalmente es un método de estimación de parámetros más eficaz.

Para generar series sintéticas desde un modelo ARMA, la ecuación (2.26) puede usarse. Primero, una variable aleatoria normal no correlacionada  $\varepsilon_t$  es generada, luego  $e_t$  se calcula como:

$$e_t = \sigma(e)\varepsilon_t \quad (2.29)$$

Para generar las series correlacionadas  $Y_t$ , se sigue el procedimiento warm-up. En este procedimiento, los valores precedentes de  $Y_t$  a  $t=1$  se asumen que son iguales a la media del proceso (que en este caso es el cero). Así,  $Y_1, Y_2, \dots, Y_{N+L}$  se puede generar utilizando la

ecuación (2.26) por la generación de  $e_{1-q}, e_{2-q}, e_{3-q}, \dots$  desde la ecuación (2.29) donde N es la longitud requerida para ser generada y L es la longitud del warm-up requerida de las asunciones iniciales de  $Y_t$ . L es arbitrariamente escogida como 50. La ventaja del procedimiento warm-up es que éste puede usarse para modelos estacionarios y periódicos de orden alto y bajo mientras que los procedimientos de la generación exacta disponible en la literatura aplican sólo para modelos estacionarios ARMA o los modelos periódicos de órdenes bajo.

### 2.3.3 Modelo Autoregresivo de Media Móvil Periodico (PARMA)

Para las series hidrológicas estacionales, las estadísticas estacionales como la media y la desviación estándar pueden ser reproducidas por un modelo ARMA periódico (PARMA). El enfoque de este método es la dependencia temporal estación-estación, por ejemplo, las correlaciones de las temporadas de invierno, verano, etc.

La necesidad de introducir las variaciones estacionales en el año hidrológico para simulación y predicción de caudales en los ríos y resaltan las ventajas de modelar con este tipo de modelos con respecto a otros.

Estos modelos se pueden ajustar de dos maneras, la primera mediante coeficientes constantes, que prácticamente es lo mismo que se realizó anteriormente con los modelos mensuales ARMA. La segunda forma de modelar es mediante coeficientes periódicos, esto quiere decir que los valores de los coeficientes de los parámetros variarían en cada mes. Por lo tanto, haciendo un reconocimiento de estos últimos se realizó el ajuste de varios modelos PARMA con coeficientes periódicos para diferentes órdenes, al final se escogió el modelo con el menor valor del criterio de información de Akaike corregido (Hurvich y Tsai 1989).

Un Modelo PARMA (p,q) puede expresarse como (Salas 1993):

$$\phi_{\tau}(B)Y_{v,\tau} = \theta_{\tau}(B)e_{v,\tau} \quad (2.30)$$

Donde  $\gamma_{v,\tau}$  representa el proceso de descarga para el año v en la estación  $\tau$ , este tiene media cero y varianza  $\sigma_{\tau}^2(Y)$  y es normalmente distribuido;  $e_{v,\tau}$  es el término de ruido no correlacionado que está normalmente distribuido con media cero y varianza  $\sigma_{\tau}^2(e)$ ;  $\phi_{\tau}(B)$  y  $\theta_{\tau}(B)$ ; son los polinomiales periódicos en B definidos como

$$\phi_{\tau}(B) = 1 - \phi_{1,\tau}B^1 - \phi_{2,\tau}B^2 - \dots - \phi_{p,\tau}B^p \quad (2.31)$$

$$\theta_{\tau}(B) = 1 - \theta_{1,\tau}B^1 - \theta_{2,\tau}B^2 - \dots - \theta_{q,\tau}B^q \quad (2.32)$$

donde  $\phi_{1,\tau}, \dots, \phi_{p,\tau}$  son los parámetros estacionales autoregresivos;  $\theta_{1,\tau}, \dots, \theta_{p,\tau}$  son los parámetros estacionales de media móvil; B es el operador de desplazamiento dirigido hacia atrás, es decir,  $B^c Y_{v,\tau} = Y_{v,\tau-c}$  y q definen el orden del modelo PARMA.

El método de momentos (MOM) puede usarse en la estimación de los parámetros de los modelos de orden bajo PARMA (p, q). De manera similar para el Modelo ARMA (p,q), el método de Mínimos cuadrados (LS) se puede usar para estimar los parámetros del modelo PARMA(p,q). La generación de datos con el modelo PARMA (p,q) se lleva a cabo de una manera similar como los modelos ARMA(p,q). El procedimiento warm-up puede ser usado nuevamente para generar las secuencias estacionales de los procesos de  $Y_{v,\tau}$  asumiendo que los valores de  $Y_{v,\tau}$  antes de la estación 1 del año 1 son iguales a cero y generando secuencias aleatorias no correlacionadas de  $e_{v,\tau}$  como las requeridas de manera similar como en el modelo ARMA (p,q).

### 2.3.4 Generando Series Sintéticas

La generación de datos es clave en la hidrología estocástica y ha recibido mucha atención en la literatura de hidrología. La generación de datos se usa por los hidrólogos para muchos propósitos. Por ejemplo, el tamaño de un reservorio, planeado y dirección de un reservorio existente, y fiabilidad de un sistema de abastecimiento de recursos hídricos como un suministro de agua a un sistema de irrigación (Salas et al. 1980). La generación de datos estocástica puede ayudar a tomar decisiones de dirección importantes sobre todo en las situaciones críticas como los períodos de sequía extendidos (Frevert et al. 1989). La filosofía principal tras la generación de datos sintéticos es que las muestras sintéticas que se generan preserven ciertas propiedades estadísticas que existen en el proceso del hidrológico natural (Lane y Frevert 1990). Como resultado, las muestras generadas y las muestras históricas deben tener la misma probabilidad de ocurrencia en el futuro. La muestra histórica no es más probable de ocurrir que cualquiera de las muestras generadas (Lane y Frevert 1990).

La generación de series de tiempo sintéticas está basada en los modelos. Una vez que el modelo ha sido definido y los parámetros han sido estimados, uno puede generar muestras sintéticas basadas en este modelo. SAMS permite generar datos sintéticos y eventualmente comparar las características estadísticas claves de los datos históricos y los generados.

### 2.3.5 Pruebas de Modelos

Según Soveinsson et al. (2009), modelo adaptado debe probarse para determinar si cumple con las asunciones del modelo y si el modelo es capaz de reproducir las propiedades estadísticas históricas de los datos manejados. Esencialmente las asunciones índices del modelo se refieren a las características subyacentes de los residuales tales como la normalidad e independencia.

#### a. Criterio de información de Akaike para modelos ARMA y PARMA

El ACF y PACF se utilizan a menudo para tener una idea del orden para poder ajustar el modelo ARMA (p,q) o del modelo PARMA (p,q). Una alternativa es el uso de criterios de información para la selección del mejor ajuste del modelo. Los dos criterios de información disponibles en SAMS son el criterio de información de Akaike Corregido (AICC) y el criterio de información de Schwarz (SIC) también se refiere a menudo como el criterio de información Bayesiano.

El AICC está dada por (Hurvich y Tsai 1989; Brockwell y Davis 1996):

$$AICC = n \ln \sigma^2(\varepsilon) + \frac{2(k+1)n}{n-k-2} \quad (2.33)$$

Dónde n es el tamaño de la muestra usada para el ajuste, k es el número de parámetros excluyendo términos constantes (k= p + q para el modelo ARMA (p, q)), y  $\sigma^2(\varepsilon)$  es la máxima estimación de probabilidad de la varianza residual. Se debe escoger el modelo con el menor valor de AICC.

La SIC está dada por (Hurvich y Tsai 1993; Shumway y Stoffer 2000):

$$SIC = n \ln \sigma^2(\varepsilon) + n + k \ln n \quad (2.34)$$

donde n, k y  $\sigma^2(\varepsilon)$  se definen de la misma manera que para la estadística de AICC. En general el SIC es bueno para muestras grandes, pero tiende a no ajustar para muestras pequeñas.

## b. Prueba de propiedades de los procesos

La prueba de propiedades de los procesos generalmente significa comparar las propiedades estadísticas del proceso que está siendo modelado, por ejemplo, el proceso  $Y_{v,r}$  en la ecuación. (2.30), con aquéllos de la muestra histórica. En general uno puede desear, que el modelo fuera capaz de reproducir los estadísticos necesarios que afectan la variabilidad de los datos. Además, el modelo debería ser capaz de reproducir ciertas características que se relacionan a la intención del uso del modelo.

Si  $Y_{v,r}$  ha sido previamente transformado  $X_{v,r}$ , el proceso original no normal, luego uno debe probar, además de las propiedades estadísticas de Y, algunas de las propiedades de X. Generalmente, las propiedades de Y incluyen la media estacional, asimetría estacional, varianza estacional y correlaciones cruzadas de estación-a-estación (en el caso de procesos de múltiples lugares), y la propiedad de X incluye la media estacional, varianza, asimetría, correlación, y correlación cruzada (para sistemas multilugares).

Además, es frecuente el caso que no sólo las propiedades del proceso estacional  $Y_{v,r}$  y  $X_{v,r}$  deben ser probadas, sino también las propiedades de los procesos anuales correspondientes AY y AX. Por ejemplo, en estos casos aparecen cuando se va a diseñar la capacidad de sistemas de reservorios o cuando la performance de las capacidades dadas de un sistema de reservorios, en el cuál uno o más reservorios son para regulaciones multianuales.

## 2.4 ACUÍFEROS

Se denomina acuífero al estrato o formación geológica que es suficientemente permeable como para permitir la circulación y el almacenamiento de agua subterránea en sus poros o grietas. Los materiales más comunes que constituyen los acuíferos son las arenas y las gravas, que constituyen los aluviones de ríos, las areniscas poco cementadas, algunos tipos de rocas volcánicas y las formaciones calcáreas (Custodio y Llamas 1996).

Por el contrario, un acuicludo se define como aquella formación geológica que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no hace posible su explotación. Dentro de este grupo pueden incluirse cienos y lúgamos (arcillas por lo general) que a pesar de poseer enormes cantidades de agua (superiores al 50% en volumen) no son hidrogeológicamente aptos para la construcción de captaciones de aguas subterráneas (Custodio y Llamas 1996).

El termino acuitardo hace referencia a la existencia de numerosas formaciones geológicas que, conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente por lo que tampoco son aptos para el emplazamiento de captaciones, pero sin embargo bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante en ciertos casos (Custodio y Llamas 1996).

Por último, se denomina acuífugo, a aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo, un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación.

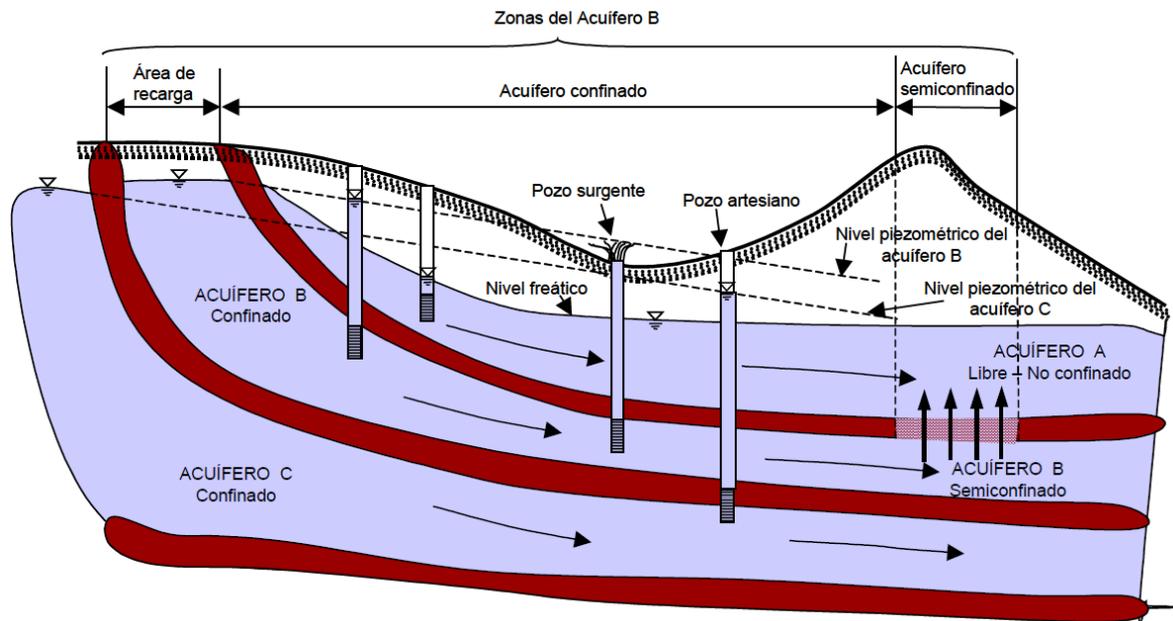
Dentro de los acuíferos podemos distinguir dos tipos: acuíferos confinados y acuíferos libres o no confinados. Se denominan acuíferos libres, no confinados o freáticos aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire (zona vadosa) y por lo tanto a presión atmosférica (Liu y Liptak 2000). En la Figura 1 el acuífero A sería un acuífero libre. En este tipo de acuífero el nivel de agua de cada pozo nos indica la altura de la zona saturada.

Por el contrario, en los acuíferos confinados, el agua está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros y huecos de la formación geológica que lo contiene, saturándola totalmente (acuífero C de la Figura 1).

Por ello si se realiza una perforación de pozos en un acuífero de este tipo, al atravesar el techo del mismo, se observará un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada altura denominada nivel piezométrico (Custodio y Llamas 1996).

De acuerdo con este nivel podemos diferenciar entre pozos surgentes o fluyentes cuando el nivel piezométrico esté situado a cota superior a la de la boca del pozo, y pozos artesianos cuando el nivel piezométrico quede por debajo de la superficie topográfica en la boca del pozo (Figura 1).

Así pues, estos acuíferos poseen una superficie piezométrica ideal, que puede materializarse considerando todos los niveles que alcanzaría el agua en sendas perforaciones distribuidas por el acuífero equivalentes a la altura piezométrica del agua en el acuífero en la vertical de cada punto.



**Figura 1:** Tipos de acuíferos.

Fuente: Fernández (2004).

Una variedad de estos acuíferos la constituyen los acuíferos semiconfinados, que pueden considerarse como un caso particular de los acuíferos confinados (Custodio y Llamas 1996), en los que el muro (parte inferior) y/o el techo (parte superior) que los encierra no sea totalmente impermeable, sino que se trate de un acuitardo que permite una lenta filtración vertical del agua, de manera que el acuífero se alimenta a partir de un acuífero o masa de agua situada encima o debajo del mismo (acuífero B de la Figura 1).

## 2.5 PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Estos parámetros permiten definir o predecir el funcionamiento o respuesta del acuífero frente a determinadas acciones exteriores.

Se definen a continuación una serie de parámetros fundamentales para caracterizar los acuíferos, estas características definen las posibilidades de explotación que ofrecen los acuíferos. En esta sección se definen y dan las nociones elementales de dichos parámetros.

### 2.5.1 Porosidad

La porosidad de un material viene expresada por la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total (Liu y Liptak 2000).

Si se considera un cierto volumen de una muestra de suelo se puede distinguir:

$V_s$  = Volumen de la parte sólida,  $V_v$  = Volumen de vacíos,  $V_t$  = Volumen total =  $V_s + V_v$

Por tanto la porosidad,  $n$ , será:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.35)$$

No se debe confundir este concepto con el de relación de vacíos (void ratio),  $e$ , que viene dado por la relación (Liu y Liptak 2000):

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.36)$$

### 2.5.2 Permeabilidad o conductividad hidráulica

La permeabilidad o conductividad hidráulica  $K$ , es una magnitud de dimensiones L/T que expresa la dificultad con la que un fluido es transportado a través del medio poroso (Liu y Liptak 2000). Por tanto, es un coeficiente que depende tanto de las propiedades de la matriz como del fluido.

Las propiedades relevantes del fluido son la densidad  $\rho$  y la viscosidad dinámica  $\mu$  o cinemática  $\nu$ . Las propiedades más importantes de la matriz porosa o suelo son la distribución del tamaño de los granos, forma de los granos y poros, tortuosidad, superficie específica y porosidad (Custodio y Llamas 1996).

La conductividad hidráulica se relaciona con la permeabilidad intrínseca mediante la siguiente expresión:

$$K = k_0 \frac{\rho g}{\mu} = k_0 \frac{g}{\nu} \quad (2.37)$$

Dónde:

$k_0$  = Permeabilidad intrínseca ( $m^2$ ),  $K$  = Coeficiente de permeabilidad (m/d),  $\rho$  = Densidad del fluido ( $kg/m^3$ ),  $\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido ( $kg/m.s$ ),  $g$  = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ),  $\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido ( $m^2/s$ ).

**Cuadro 1:** Magnitudes de K para diferentes materiales

<b>Clasificación Geológica</b>	<b>K (m/d)</b>
Material No consolidado	
Arcilla	$10^{-8} - 10^{-2}$
Arena Fina	1 – 5
Arena Media	$5 - 2 \times 10^1$
Arena Gruesa	$2 \times 10^1 - 10^2$
Grava	$10^2 - 10^3$
Mezcla de Arena y Grava	$5 - 10^2$
Mezcla de Arcilla - Arena- grava	$10^{-3} - 10^{-1}$
Rocas	
Arenisca	$0^{-3} - 1$
Rocas Carbonatadas	$10^{-2} - 1$
Pizarras	$10^{-7}$
Rocas Sólidas	$< 10^{-5}$
Rocas Fracturadas	Casi 0 - $3 \times 10^2$
Rocas Volcánicas	Casi de 0 - $10^3$

Fuente: Fernández (2004).

### 2.5.3 Transmisividad

Otro de los parámetros que definen las características de un acuífero es la transmisividad  $T$ , que indica la facilidad con la que el agua se transmite a través de un acuífero de dimensiones conocidas y se define como el flujo por unidad de espesor del acuífero por unidad de gradiente hidráulico (Liu y Liptak 2000).

$$T = K b \quad (2.38)$$

Dónde:  $T$  = Transmisividad ( $m^2/d$ ),  $K$  = Coeficiente de permeabilidad (m/d),  $b$  = Espesor saturado (m).

### 2.5.4 Coeficiente de almacenamiento

Se define como el volumen de agua que una columna vertical del acuífero, que tiene como base la unidad de área y como altura el espesor medio del acuífero, libera por expansión

del agua y compactación de la matriz sólida, cuando la carga hidráulica disminuye en una unidad.

$$S = \rho g m (\alpha + \eta\beta) = m Ss \quad (2.39)$$

Dónde:  $m$ , es el espesor medio del acuífero, es adimensional y sus valores en acuíferos confinados varían de  $5 \times 10^{-5}$  a  $5 \times 10^{-3}$ .

Los acuíferos confinados y semi-confinados liberan agua solo por expansión del agua y compactación de la matriz sólida del acuífero, mientras que los acuíferos libres y semi-libres además liberan agua por drenaje gravitacional.

## **2.6 ECUACIONES FUNDAMENTALES DEL FLUJO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Como parte del ciclo hidrológico, el agua subterránea está permanentemente en movimiento desde zonas de recarga natural o artificial hacia otras zonas de descarga.

A continuación, se indican las leyes básicas y ecuaciones que gobiernan el movimiento del agua subterránea en los acuíferos, y se indican los distintos métodos de resolución de dichas ecuaciones.

### **2.6.1 La Ley de Darcy**

Los fundamentos teóricos del flujo de agua subterránea tienen su origen en los trabajos experimentales realizados por Henry Darcy en 1856 (Custodio y Llamas 1996). Darcy experimentalmente encontró los factores que gobiernan el flujo hídrico en un medio poroso.

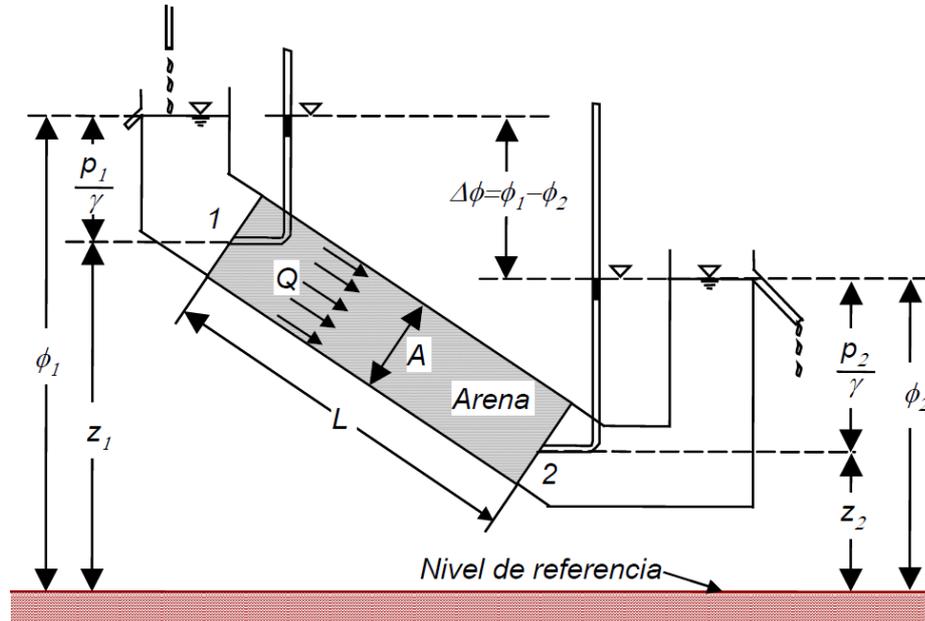
En la Figura 2 se muestra uno de estos experimentos. Darcy observó la diferencia de alturas  $\Delta\phi$  que se generaba cuando se hacía circular un caudal de agua a través de un lecho de arena.

Darcy concluyó que el caudal drenado  $Q$  es proporcional a la sección transversal  $A$ , proporcional a la diferencia de alturas ( $\phi_1 - \phi_2$ ) e inversamente proporcional a la longitud  $L$ .

$$Q = K A (\phi_1 - \phi_2) / L \quad (2.40)$$

Donde  $K$  es un coeficiente de proporcionalidad denominado conductividad hidráulica, las alturas  $\phi_1$  y  $\phi_2$  se miden respecto a un nivel de referencia horizontal arbitrario ( $L_1$  y

Litpak 2000), y  $\phi = z + p/\gamma$  describen la suma de las energías potencial y de presión del fluido por unidad de peso, donde  $p$  es la presión y  $\gamma$  es el peso específico del agua y  $z$  la altura.



**Figura 2:** Experimento de Darcy.

Fuente: Fernández (2004).

La pérdida de energía  $\Delta\phi = (\phi_1 - \phi_2)$  se debe a la fricción del flujo a través de los recorridos tortuosos del medio poroso. Por su parte a la relación  $Q/A$  se le conoce como caudal específico,  $q$ , o velocidad de Darcy,  $J$  se define como gradiente hidráulico, al cociente  $(\phi_1 - \phi_2)/L$ . Así la ecuación 1 se transforma en:

$$q = K (\phi_1 - \phi_2) / L = K J \quad (2.41)$$

Si  $\Delta\phi$  y  $L$  tienden a 0, la ecuación de Darcy se convierte en la siguiente expresión:

$$q = -K \frac{\partial\phi}{\partial L} \quad (2.42)$$

Hay que aclarar que la velocidad de Darcy,  $q$ , no es la velocidad real de agua en el subsuelo, ya que el agua está limitada a circular a través de los poros (Liu y Litpak 2000) por ello se define una velocidad real,  $v$ , como:

$$v = q / n \quad (2.43)$$

Donde  $n$  representa la porosidad del suelo.

La expresión de la Ley de Darcy referida al flujo unidimensional de un fluido homogéneo e incompresible puede generalizarse para el flujo tridimensional asumiendo la misma conductividad hidráulica en todas las direcciones (Liu y Liptak 2000), y así se obtiene:

$$q_x = -K \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.44)$$

$$q_y = -K \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (2.45)$$

$$q_z = -K \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.46)$$

En el caso de un medio anisótropo, la generalización de la Ley de Darcy conduce a las siguientes ecuaciones:

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial \phi}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial \phi}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.47)$$

$$q_y = -K_{yx} \frac{\partial \phi}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial \phi}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.48)$$

$$q_z = -K_{zx} \frac{\partial \phi}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial \phi}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.49)$$

En general los problemas con suelos anisótropos pueden transformarse fácilmente en problemas para suelos isótropos si consideramos que  $K_{xy}=K_{xz}=K_{yx}=K_{yz}=K_{zx}=K_{zy}=0$ , aproximación que puede realizarse en la mayor parte de los casos (Liu y Liptak 2000).

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.50)$$

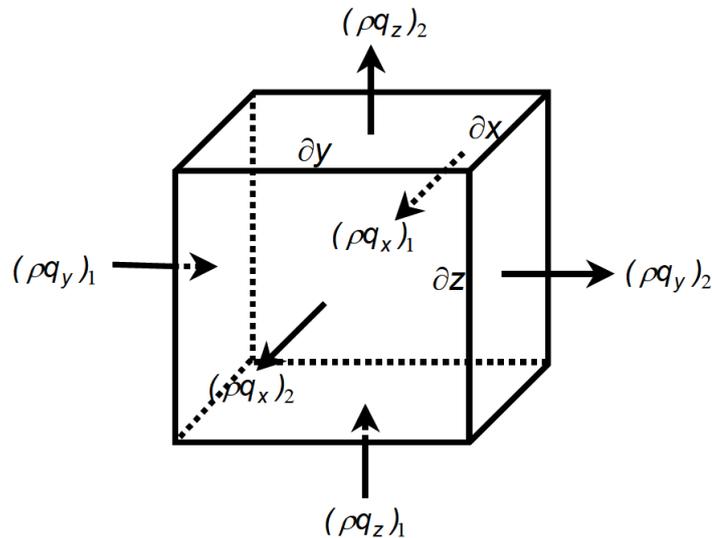
$$q_y = -K_{yy} \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (2.51)$$

$$q_z = -K_{zz} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.52)$$

## 2.6.2 Ecuación de continuidad

Para resolver problemas de flujo de agua subterránea mediante la Ley de Darcy no es suficiente. Es decir solamente proporciona tres ecuaciones pero cuatro incógnitas: tres componentes del vector descarga específica y la carga. Una cuarta ecuación se puede obtener haciendo intervenir el principio físico fundamental de la conservación de la masa.

La ecuación de la continuidad está basada en el principio de conservación de la masa o en el balance de materia. El planteamiento matemático se realiza sobre un elemento diferencial de volumen,  $\partial V$ , como el que se muestra en la Figura 3 de lados  $\partial x$ ,  $\partial y$ ,  $\partial z$ , y en el que se considera la materia que entra, sale o se almacena en dicho volumen.



**Figura 3:** Elemento diferencial de volumen para la deducción de la ecuación de continuidad.

Fuente: Fernández (2004).

La ecuación de balance de agua o de conservación de masa establece que:

Flujo de entrada – Flujo de salida = Cambio en el almacenamiento

$$\frac{(\rho q_y)_1 - (\rho q_y)_2}{\partial_y} \partial x \partial y \partial z \partial t = \Delta M_y \quad (2.53)$$

La variación de masa por unidad de tiempo y unidad de volumen  $\partial V$ ,  $\Delta \mu_y$ , será:

$$\Delta\mu_y = -\frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} \quad (2.54)$$

De la misma manera la variación de masa por unidad de tiempo y volumen en las direcciones x, z.

Sumando las tres ecuaciones se obtienen la diferencia entre la entrada y la salida:

$$\Delta\mu = \Delta\mu_x + \Delta\mu_y + \Delta\mu_z \pm W(x, y, z,) \quad (2.55)$$

$$\Delta\mu = -\left(\frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z}\right) \pm W(x, y, t) \quad (2.56)$$

Donde W es un término general de fuentes o sumideros y define la entrada o salida de un volumen de fluido al sistema en unidades de volumen por unidad de tiempo.

Siendo el signo positivo o negativo en función de si se trata de una fuente externa que aporta agua al acuífero (+) o un sumidero que retira agua del mismo (-).

Aplicando el principio de conservación de masa, la variación en la masa  $\Delta\mu$ , debe ser igual al almacenamiento que tiene lugar en el volumen de control durante un  $\partial t$ , almacenamiento que se realiza por la acumulación de fluido en el interior de los poros (n). Así obtenemos que

$$\frac{\partial(\rho n)}{\partial t} = -\left(\frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z}\right) \pm \rho W(x, y, t) \quad (2.57)$$

A partir de esta ecuación, y teniendo en cuenta el concepto de coeficiente de almacenamiento específico antes indicado, obtenemos la expresión de la ecuación de continuidad (Custodio y Llamas, 1996; Liu y Liptak 2000):

$$\rho S_0 \frac{\partial\phi}{\partial t} = -\left(\frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z}\right) \pm \rho W(x, y, z) \quad (2.58)$$

### 2.6.3 Ecuaciones generales del flujo subterráneo

A partir de la ecuación de continuidad, si consideramos que la densidad del agua permanece constante, y aplicamos la Ley de Darcy se pueden obtener distintas ecuaciones en función del medio (Custodio y Llamas 1996).

Así para el caso de un medio no homogéneo y anisótropo obtendremos

$$S_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \pm W(x, y, t) \quad (2.59)$$

Para un medio isótropo no homogéneo obtendremos:

$$S_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \pm W(x, y, t) \quad (2.60)$$

Para un medio homogéneo e isótropo:

$$S_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \pm W(x, y, t) \quad (2.61)$$

En el caso de flujo estacionario, o bien cuando tanto el sólido como el fluido sean incompresibles, el segundo término de la ecuación se anula, obteniéndose:

$$0 = K \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) \pm W(x, y, t) \quad (2.62)$$

Finalmente, en régimen estacionario y sin aporte o retirada de agua  $F$ , se obtendría la conocida ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.63)$$

#### 2.6.4 Resolución de la ecuación general del flujo

En general los métodos que permiten alcanzar la solución de un determinado sistema se clasifican en analíticos y numéricos.

Los métodos analíticos emplean formulas simples y proporcionan una solución exacta en el punto de cálculo, aunque no admiten heterogeneidades. Por ello las soluciones analíticas de las ecuaciones generales de flujo son raramente posibles salvo que se trate de sistemas muy sencillos (Bear 1979).

Por su parte los métodos numéricos requieren de una discretización espacial y temporal y son capaces de soportar heterogeneidades en el sistema. La discretización consiste en reemplazar el carácter continuo del sistema dado por las diferencias infinitesimales, por

pequeños incrementos finitos  $\Delta\phi$ , en el espacio y en el tiempo  $\Delta t$ , de manera que los elementos diferenciales  $d\phi$  y  $dt$  son sustituidos por incrementos  $\Delta\phi$  y  $\Delta t$ .

Los métodos numéricos más conocidos son: elementos finitos y diferencias finitas (Schwartz and Zhang 2003). El Cuadro 2 muestra algunas ventajas y desventajas del uso de estas técnicas numéricas para resolver las ecuaciones de flujo subterráneo (Fernández 2004).

La resolución de la ecuación general de flujo por el método de diferencias finitas consiste en sustituir los infinitos puntos que constituye el sistema acuífero reflejado en el modelo conceptual por un número finito de puntos o nodos regularmente espaciados.

Cada nodo es el centro de un bloque cuadrado o rectangular llamado celda, quedando discretizado el medio físico en un conjunto de celdas de dimensiones conocidas.

**Cuadro 2:** Ventajas y desventajas de los métodos numéricos de resolución de la ecuación de flujo

<b>Método</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Diferencias Finitas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conserva la masa</li> <li>• Intuitivo, simple, conocido y comprobado, fácil de programar</li> <li>• Es el más empleado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La red rectangular genera discretización fuera de las zonas de interés.</li> <li>• Dificil adaptación a sistemas complejos con capas deformes.</li> </ul>
Elementos Finitos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Discretización más versátil y eficiente (en zonas de interés solamente).</li> <li>• Se adapta bien a geología compleja.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No intuitivo. La teoría es más compleja.</li> <li>• Conserva la masa sólo globalmente. Errores locales en el balance de aguas pueden ocurrir.</li> </ul>

Fuente: Fernández (2004).

Cada una de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales planteadas anteriormente está relacionada con un caso específico de flujo a través de medios porosos pero en sí misma no contiene información acerca del problema específico y tiene un infinito número de soluciones que se corresponden a casos particulares de flujo a través del dominio del flujo (Liu y Liptak 2000).

Para obtener de esta multitud de soluciones una solución particular que corresponda a un problema específico de interés es necesario aportar información adicional que no está

contenida en las ecuaciones. Esta información adicional que, junto con la ecuación diferencial, define un problema concreto, debe contener especificaciones acerca de:

- a) La geometría del dominio a través del cual tiene lugar el flujo.
- b) Valores de todos los coeficientes físicos relevantes (p.e.  $K$ ,  $S_0$ ).
- c) Condiciones iniciales que describan el estado inicial del fluido en el dominio considerado.
- d) Condiciones de interacción entre el fluido y los alrededores del dominio del flujo (condiciones de contorno), como niveles constantes, barreras, drenajes, bombeos, ríos, evapotranspiración, etc.

## **2.7 MODELIZACIÓN MATEMÁTICA CON VISUAL MODFLOW**

En este trabajo se ha empleado el Visual Modflow la para el estudio de la modelización del flujo en el Valle de Chao, este es un programa informático que simula el flujo tridimensional de aguas subterráneas a través de medios porosos usando el método de diferencias finitas.

Las generalidades relevantes de este software son: simular en régimen estacionario o transitorio sin importar las condiciones en las que se encuentren las capas, estas pueden ser confinadas, libres o parcialmente convertibles.

Hay que definir los aspectos hidrológicos como pozos, zonas de recarga, evapotranspiración, drenes y ríos; la topografía de la zona, el fondo de las capas que conforman el acuífero, la conductividad hidráulica, los coeficientes de almacenamiento específico y rendimiento específico; además de trabajar con acuíferos en medios homogéneos, isótropos, heterogéneos, anisótropos, multicapas y establecer la interacción río-acuífero (Todd and Mays 2005; Beach 2006).

Visual Modflow es un paquete informático que integra las más recientes versiones, de dominio público y privadas, de MODFLOW y MT3D para la simulación de modelos de flujo y de transporte de contaminantes.

## **2.8 GESTIÓN DE LA OFERTA Y DEMANDA DE AGUA**

### **2.8.1 Definición y periodo básico**

El balance hídrico es un equilibrio de todas las entradas y salidas de agua desde un sistema y hacia él, considerando la diferencia entre las entradas y salidas como la tasa de variación de almacenamiento.

Los balances hídricos para valores medios se calculan para un ciclo anual (año calendario o año hidrológico), aunque también pueden hacerse para cualquier estación o mes.

### **2.8.2 Modelo de Planificación y Evaluación WEAP (Water Evaluation and Planning System)**

WEAP es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos cuyo propósito es ayudar más que sustituir al planificador experto. Proporciona un marco amplio, flexible y fácil de usar para la planificación y análisis de políticas.

En general, este modelo hidrológico es espacialmente continuo con un área de estudio configurado como un set de subcuencas contiguas que cubren toda la extensión de la cuenca de análisis. Un set homogéneo de datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada una de estas subcuencas, que se encuentran divididas en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo. Un modelo cuasi físico unidimensional, con dos receptáculos de balance de agua para cada tipo de cobertura/uso de suelo, reparte el agua entre escorrentía superficial, infiltración, evaporación, flujo base y percolación. Los valores de cada una de estas áreas se suman para obtener los valores agregados en una subcuenca. En cada tiempo de corrida del modelo, WEAP calcula primero los flujos hidrológicos, que son traspasados a los ríos y acuíferos asociados. La distribución de agua se realiza para el mismo tiempo de corrida, donde las restricciones relacionadas con las características de los embalses y la red de distribución, las regulaciones ambientales y a la vez las prioridades y preferencias asignadas a diferentes puntos de demanda son usadas como condiciones de operación de un algoritmo de programación lineal que maximiza la satisfacción de demanda hasta el mayor valor posible (Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile - Stockholm Environment Institute 2009).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

##### **3.1.1 Proyecto Especial Chavimochic**

El Proyecto Especial Chavimochic se encuentra ubicado en la parte nor-oeste del Perú en las provincias de Virú, Trujillo y Ascope, pertenecientes a la región La Libertad.

Tiene un área comprendida entre la margen derecha del río Santa por el sur, hasta las Pampas de Urricape por el norte (Paiján).

En el ámbito del proyecto se encuentra la ciudad de Trujillo, el centro poblado más importante de la región y uno de los más importantes del país ubicado al norte de Lima.

Geográficamente se encuentra entre los paralelos 7°33' y 8°39' latitud sur y los meridianos 79°29' y 78°27' de longitud oeste, desde la bocatoma Chavimochic en el río Santa hasta las Pampas de Urricape.

##### **a. Cuenca del río Santa**

La Cuenca del Santa está ubicada en la región Norte – Centro del Perú, entre los paralelos 07°57' y 10°15' de Latitud Sur, y los meridianos 77°12' y 78°41' de Longitud Oeste, en la zona central de la Sierra y la Costa peruana, abarcando territorios de los departamentos de Ancash y La Libertad. Pertenece a la vertiente hidrográfica del Pacífico, abarcando las provincias más importantes del departamento de Ancash (Bolognesi, Recuay, Aija, Huaraz, Carhuaz, Yungay, Huaylas, Corongo, Pallasca y Santa) y drena un área total de 12 200 Km<sup>2</sup> de la cual la cuenca imbrífera es de 10 200 Km<sup>2</sup> (INADE 2002)

El río Santa desde sus nacientes a 4 080 m.s.n.m. en la Laguna Conococha tiene un desarrollo longitudinal de Sur a Norte hasta el final del Cañón del Pato donde cambia de dirección a Este – Oeste hasta su desembocadura en el Océano Pacífico con un recorrido total de 316 Km; tiene una pendiente promedio de 1,4 % diferenciándose tres tramos de

pendiente promedio variable de 1,21 %, 2,17 % y 0,74 %. La precipitación media anual es de 1200 mm, pero varía desde algunos mm en la costa hasta más de 2 000 mm en las partes altas.

Los glaciares de la Cordillera Blanca que cubren un área de 527.62 Km<sup>2</sup>, así como las 180 lagunas que existen en el ámbito del Parque Nacional Huascarán, tienen un efecto regulador de las descargas del río Santa en el período de estiaje. De acuerdo al Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas del 2014 realizado por la Unidad Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), la Cordillera Blanca debido a procesos físicos (recesión, fragmentación y extinción de glaciares), esto ha provocado que en los últimos 50 años desde 1970, los glaciares habían reducido en 27 % su volumen (ANA 2014). Las condiciones climáticas en la cuenca son muy variadas; la temperatura varía desde 0 °C en las partes altas hasta 30 °C en la parte baja; y la humedad relativa varía entre 58 % a 81 %.

#### **b. Cuenca del río Chao**

Está ubicada en el departamento de La Libertad, aproximadamente entre los paralelos 8°25' y 8°35' de Latitud Sur y entre los meridianos 78°15' y 78°45' de Longitud Oeste. Pertenece a la vertiente hidrográfica del pacífico, abarcando parte de las provincias de Virú y Santiago de Chuco, drena un área total de 1 558 Km<sup>2</sup>, de la cual la cuenca de drenaje es de 690 Km<sup>2</sup> (arriba de 1500 msnm). Está conformada por una hoya hidrográfica escarpada y alargada, de fondo profundo y quebrado, con fuertes pendientes.

La escorrentía del sistema hidrográfico del río Chao tiene su origen en las precipitaciones estacionales que caen en los cerros ubicados en los sectores elevados de la cuenca alta formando los ríos Huamanzaña, Chorobal y Cerro Blanco con un recorrido total de 76 km; los que tienen una pendiente promedio de 5 % aunque en las partes altas se encuentran pendientes de hasta 12 %. La precipitación media anual varía desde algunos mm en la costa hasta más de 1200 mm en las partes altas (INADE 2002).

La cuenca del río Chao, que abastece con agua de riego al valle del mismo nombre es de régimen hidrológico irregular con pocos meses en que se presenta la escorrentía, meses de verano (enero - abril), aportando volúmenes pequeños de masa escurrida. El agua superficial estacional, es empleada parcialmente en la agricultura en el riego del valle antiguo con sistemas de riego a gravedad. Las poblaciones asentadas en este valle se abastecen con aguas subterráneas (INADE 2002).

### **c. Cuenca del río Virú**

Está ubicada en el departamento de La Libertad, aproximadamente entre los paralelos 8°05' y 8°30' de Latitud Sur y entre los meridianos 78°15' y 78°50' de Longitud Oeste. La cuenca está conformada por una hoya hidrográfica escarpada y alargada, de fondo profundo y quebrado, con fuertes pendientes, limitada por cadenas de cerros que en dirección al Océano Pacífico tienen un descenso sostenido y rápido al nivel de las cumbres. Pertenece a la vertiente hidrográfica del Pacífico, abarcando parte de las provincias de Virú, Julcán y Trujillo, drena un área total de 2052 Km<sup>2</sup>, de la cual la cuenca imbrífera es de 1081 Km<sup>2</sup> arriba de 1500 msnm (INADE 2002).

El río Virú nace en la provincia de Huamachuco, cerca de las alturas de Santiago de Chuco y es formado principalmente por los ríos Carabamba y Huacapongo. El río Virú tiene un recorrido total de 89 Km y una pendiente promedio de 5 %, aunque en las partes altas se encuentran pendientes de hasta 12 %. La precipitación media anual varía desde algunos mm en la costa hasta más de 1200 mm en las partes altas (INADE 2002).

La cuenca del río Virú que abastecen con el agua de riego al valle del mismo nombre es de régimen hidrológico irregular con pocos meses de verano (enero a abril) en que se presenta la escorrentía, aportando volúmenes pequeños de masa escurrida 106,66 MMC anual. El agua superficial estacional es empleada parcialmente en la agricultura en el riego del valle antiguo con sistemas de riego a gravedad. Las poblaciones asentadas en este valle se abastecen con aguas subterráneas.

### **d. Cuenca del río Moche**

Está ubicada en el Departamento de La Libertad, aproximadamente entre los paralelos 7°15' y 8°20' de Latitud Sur y entre los meridianos 78°15' y 79°10' de Longitud Oeste. Está conformada por una hoya hidrográfica escarpada y alargada, de fondo profundo y quebrado, con fuertes pendientes. Limitada por cadenas de cerros que en dirección al océano Pacífico tienen un descenso sostenido y rápido al nivel de las cumbres. Pertenece a la vertiente hidrográfica del pacífico, abarcando parte de las provincias de Trujillo, Otuzco, Santiago de Chuco y Julcán, drena un área total de 2708 Km<sup>2</sup>, de la cual la cuenca imbrífera es de 1418 Km<sup>2</sup> arriba de 1500 msnm (INADE 2002).

El río Moche nace en las alturas de la provincia de Otuzco, en la Laguna Grande a 4 000 msnm, en las proximidades del pueblo de Quiruvilca, tiene una longitud de 102 Km, hasta la desembocadura en el Océano Pacífico, con una pendiente promedio de 4,5 % y está formado principalmente por los ríos Otuzco y Simbal. La precipitación varía entre 0 mm/año a 1200 mm/año en la parte alta. La desembocadura del río Moche, está ubicada en 116 Km al Norte del Santa, a unos 47 Km de la desembocadura del río Virú y a 10 Km al Norte del Puerto de Salaverry (INADE 2002).

La agricultura es la actividad más importante en la cuenca, concentrándose en la Costa cerca de 10 000 ha, las cuales se abastecían en épocas de estiaje complementariamente con aguas del acuífero subterráneo. Se tienen cultivos industriales como la caña de azúcar y espárrago, cultivos varios como maíz, piña, frutales, hortalizas y pan llevar.

#### **e. Cuenca del río Chicama**

Está ubicada en los departamentos de La Libertad y Cajamarca, aproximadamente entre los paralelos 7°21 y 8°01' de Latitud Sur y entre los meridianos 78°16' y 79°27' de Longitud Oeste. Pertenece a la vertiente hidrográfica del pacífico, abarcando parte de las provincias de Ascope, Otuzco, Julcán, Santiago de Chuco y Gran Chimú de La Libertad y Contumazá, Cajamarca y Cajabamba de Cajamarca drena un área total de 5822 Km<sup>2</sup> de la cual la cuenca imbrífera es de 2472 Km<sup>2</sup> arriba de 1500 m.s.n.m. Está conformada por una hoya hidrográfica escarpada y alargada, de fondo profundo y quebrado, con fuertes pendientes, limitada por cadenas de cerros que en dirección al Océano Pacífico tienen un descenso sostenido y rápido al nivel de las cumbres. La precipitación anual varía entre 5,50 mm/año en el litoral a 1500 mm/año en la cuenca alta. El río Chicama nace en las alturas de las provincias de Otuzco, Gran Chimú y Contumazá, en el cerro Collacuyan. Sus principales afluentes son los ríos Pinchaday, Huanca y San Felipe. La dirección general del río es de N.E. a S.O. Las descargas se concentran en los meses de enero a abril, necesitándose de la explotación del acuífero subterráneo para la cobertura de las demandas en la época de estiaje (INADE 2002).

La desembocadura del río Chicama está situada a 148 Km al Norte de la desembocadura del río Santa, y a 32 Km, al Norte del valle Santa Catalina. La cuenca húmeda es de 3600 Km<sup>2</sup>; la estación de aforos está ubicada en El Salinar a 25 Km del pueblo de Ascope, a 50 Km de la desembocadura a 350 msnm.

En el valle de Chicama se desarrolla una agricultura bajo riego con condiciones deficitarias, debido a que el río, la principal fuente de abastecimiento de agua, es de régimen muy irregular y de características tormentosas. Los volúmenes se concentran entre los meses de enero a abril, y una severa escasez entre julio y octubre. El área neta cultivada del valle es del orden de 65 000 ha, de las cuales 45 000 ha están ubicadas bajo el proyecto del canal Chavimochic (INADE 2002).

### **3.1.2 Proyecto Especial Chinecas**

El área de desarrollo del presente estudio se localiza en el ámbito asignado al Proyecto Especial Chinecas (P.E Chinecas), que incluye las tierras de los valles de Santa-Lacramarca (margen izquierda del Santa), Nepeña y Casma - Sechín, así como las tierras eriazas ubicadas en los intervalles. La Figura 4, muestra en forma simplificada el ámbito del proyecto.

Geográficamente se encuentra entre los paralelos 8°39' y 9°30' latitud sur y los meridianos 78°22' y 78°23' de longitud oeste. Políticamente pertenece a la Región Ancash, provincias de Santa y Casma; el centro urbano más importante es la ciudad de Chimbote, a 431 Km. al norte de la ciudad de Lima.

#### **a. Cuenca del río Nepeña**

Políticamente la cuenca del río Nepeña está comprendida íntegramente en el Departamento de Ancash formando parte de las provincias de Santa y Huaylas (Pamparomas). Sus límites son: Por el Norte con la cuenca del río Lacramarca, al Sur con la Cuenca del río Casma, al Este con la Cuenca del río Santa, y por el Oeste con el Océano Pacífico.

La cuenca del río Nepeña, tiene una altitud máxima: 4910 msnm, media de 1400 msnm y mínima de 0,000 en la desembocadura en el mar.

El río Nepeña nace en las alturas de la laguna de Chupicocha, a 4600 msnm, tiene una longitud máxima de recorrido desde sus nacientes de 73,5 Km, presentando pendiente promedio del 6%, la cual se hace más fuerte en el tramo de la parte alta comprendido entre la laguna Mataracocha y Colcap, donde la pendiente alcanza aproximadamente 22%.

La topografía es plana en la parte baja con pendientes menores al 15%, ondulado a empinado en la parte media baja con pendientes de 15% a 45%, y escarpado en la parte media alta.

En la parte baja se presenta un valle denominado Nepeña, muy importante, por su contribución a la economía de la región.

En las estaciones ubicadas en la zona baja de la Cuenca la temperatura varía de 14 a 27°C, la precipitación promedio anual varía de 4,5 a 11,2 mm en las estaciones de Huacatambo y Nepeña, la humedad relativa de 67% a 76%, las horas de sol de 2386 a 2424 horas anuales y la evaporación media anual es de 480 a 713 mm (INADE 2002).

#### **b. Cuenca del río Casma - Sechin**

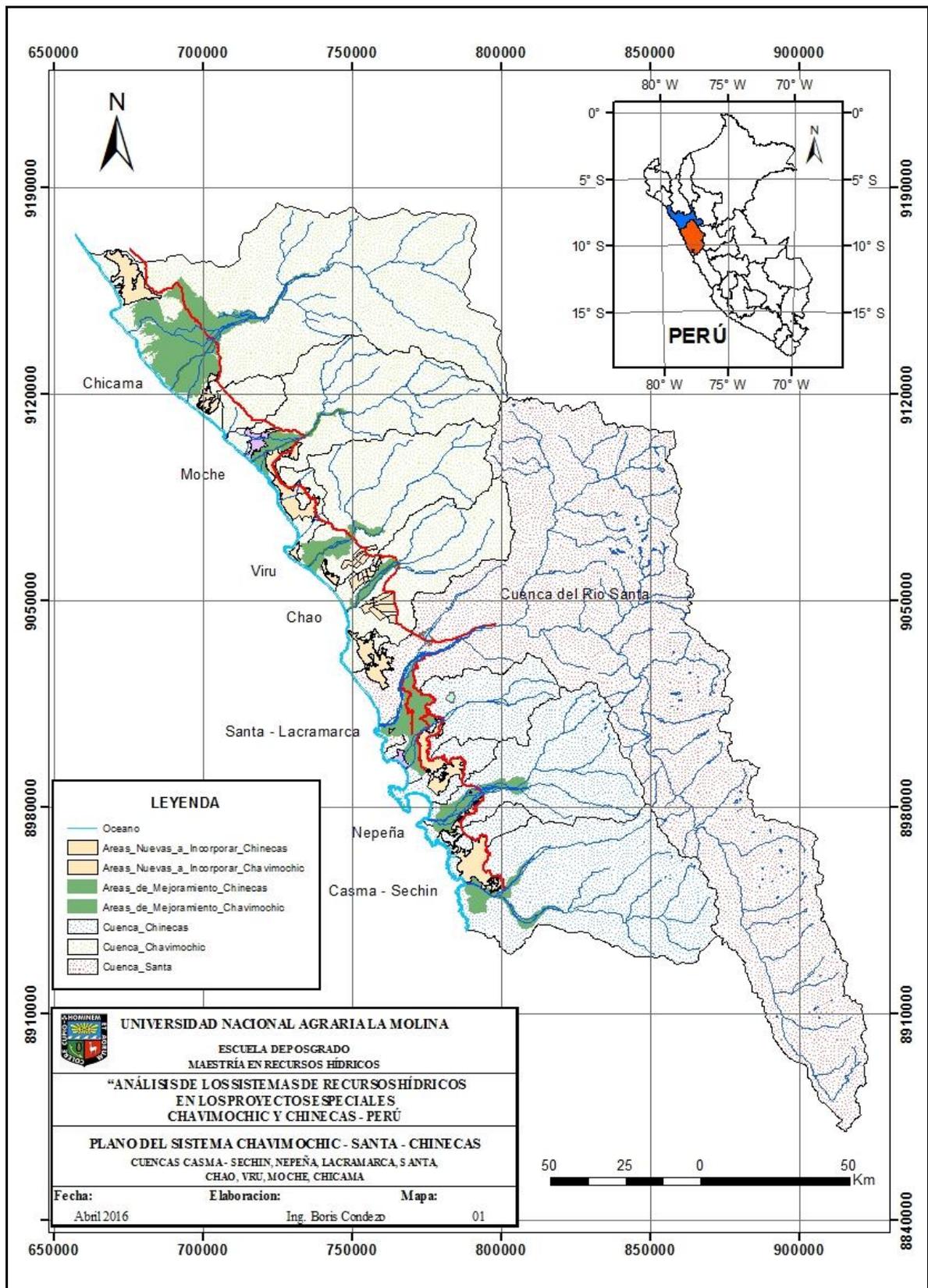
Geográficamente limita por el Norte y Noroeste con la cuenca del río Nepeña por el Sur con la cuenca del río Culebras, por el Oeste con el Océano Pacífico y por el Este con la Cuenca del Santa.

La cuenca del río Casma Sechín, tiene una altitud máxima: 4862 msnm y una altitud media de 2000 msnm y mínima de 0,000 en la desembocadura en el mar.

El río Casma nace en las alturas de la Cordillera Negra con el nombre de río Pira, manteniendo esta denominación hasta la zona de Chacchán; desde este lugar hasta el pueblo de Pariacoto adopta el nombre de Chacchán, de ahí adopta el nombre de río Grande hasta la confluencia con el río Yaután. A partir de Yaután hasta el Océano Pacífico adopta el nombre de Casma. La longitud total es de 100 km, con una pendiente promedio de 4% (INADE 2002).

El río Sechín, afluente del río Casma, tiene una longitud de 70 Km y una pendiente promedio de 5%. La topografía es plana en la parte baja, con pendientes menores a 15%, ondulado a empinado en la parte media con pendientes mayores de 15%, empinado a escarpado en la parte alta con pendientes mayores al 60%.

La variedad de climas es similar a las cuencas Nepeña y Santa. La temperatura media anual varía de 25°C a 15°C, reduciéndose con la altitud. La precipitación promedio anual varía de 5,3 mm en la Costa a 779 mm en la estación ubicada en la parte más alta de la Cuenca. La humedad relativa varía de 89% a 64% en la parte baja y media de la Cuenca. En general la humedad relativa disminuye con la altitud. Las horas de sol promedio en la parte baja de la Cuenca es de 1500, estimándose para la parte alta un comportamiento similar al de Nepeña y Santa (INADE 2002).



**Figura 4:** Sistema Chavimochic, Santa y Chinecas.

## **3.2 DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL**

### **3.3.1 Proyecto Especial Chavimochic**

Según P.E. Chavimochic (2010), se presenta la siguiente descripción de las estructuras:

Bocatoma 412 msnm, Diseñada y construida para derivar 85 m<sup>3</sup>/s.

Remodelación y modificación de parte de la Bocatoma existente, mediante la implementación y modificaciones sustanciales en la obra existente, con la modificación del barraje móvil, la adecuación del túnel de desvío para captar en época de estiaje, y otras, con la finalidad de mejorar su operación y mantenimiento anual.

Canal Madre I Etapa

El Canal Madre tiene una capacidad de 85 m<sup>3</sup>/s desde la Bocatoma al desarenador (Km 4+250), desde este lugar hasta el km 20+530 el Canal tiene una capacidad de 82 m<sup>3</sup>/s. Aquí habrá un partidor que dará inicio a la alimentación al Reservoirio Palo Redondo por donde discurrirá un gasto de 12 m<sup>3</sup>/s, mientras que los otros 70 m<sup>3</sup>/s continuarán hasta su empalme con el túnel aductor de la Central Hidroeléctrica en la progresiva Km 20+530 del Canal Madre hasta la progresiva Km 83+289.56 en la que tiene una capacidad de 66 m<sup>3</sup>/s y entrega aguas a las estructuras del Sifón Virú.

Sifón Virú (2ª línea)

Para fines de una oportuna operación, mantenimiento y regulación del abastecimiento de agua, se ha ejecutado además la segunda línea del sifón invertido Virú.

Canal Madre II Etapa

Comprende la Primera Línea del Sifón Virú y el Canal Madre Virú – Moche desde la progresiva Km 83+289.56 hasta la progresiva Km 155+000.00 en la que tiene una capacidad de 50 m<sup>3</sup>/s. Además, se construyó la Planta de Tratamiento de Agua Potable para la ciudad de Trujillo y parte del Sistema de Drenaje del valle de Moche.

Planta de Tratamiento de Agua Potable, Central Hidroeléctrica de Virú, Canales Integradores Valle de Virú

### 3.3.2 Proyecto Especial Chinecas

Según P.E. Chinecas (2012), se presenta la siguiente descripción de las estructuras:

#### Sistema La Huaca

El Sistema La Huaca, tiene como ámbito de influencia las tierras ubicadas en los valles de Santa- Lacramarca (11,278 ha) y Nepeña (6,879 ha), así como las tierras nuevas situadas en los intervalles correspondientes. Este sistema incluye además, el suministro de las demandas poblacionales de diferentes poblados, siendo el más importante el distrito de Nuevo Chimbote. La infraestructura principal de riego del Sistema La Huaca incluye, además de la bocatoma, un canal de conducción (canal Principal Chinecas) que actualmente se desarrolla desde el río Santa hasta la margen izquierda del río Nepeña.

La Bocatoma La Huaca se encuentra ubicada en la cota 236 msnm del cauce del río Santa y cuenta con una arquitectura hidráulica que permite derivar un caudal de hasta 35 m<sup>3</sup>/s y evacuar por el río un caudal de avenidas de hasta 3,000 m<sup>3</sup>/s, mediante una estructura mixta (aliviadero de compuertas, barraje fijo y dique de cierre), que cubren todo el ancho del cauce.

El canal Principal tiene una longitud aproximada de 113.1 Km y está dividido en dos tramos; el primero, corresponde al canal Irchim (40.1 Km de longitud), construido en la década del 60, que ha sido remodelado y ampliado por el P.E Chinecas para que permita disponer de una capacidad de conducción variable entre 35 m<sup>3</sup>/s (hasta el desarenador Km 3+075), 32 m<sup>3</sup>/s (Km 3+075 – 29+100) y 27 m<sup>3</sup>/s (Km 29+100 – 40+100). El segundo tramo, llamado canal Principal Chinecas (hasta el Km 71+810), ha sido construido en épocas más recientes a partir del año 1995 por el Consorcio Chinecas y corresponde a un canal revestido con concreto con capacidad de conducción variable entre 20 y 10 m<sup>3</sup>/s. Actualmente el Consorcio Veta Colorada ha concluido un tercer tramo de canal hasta el Km 87+920, igualmente revestido con concreto con capacidad de conducción variable entre 10 y 7.5 m<sup>3</sup>/s, la capacidad de todos los túneles está limitada actualmente a 12 m<sup>3</sup>/s.

#### Sistema La Víbora

El Sistema La Víbora, tiene como ámbito de influencia las tierras ubicadas en el denominado Valle Viejo del río Santa (6,680 ha) y cubre además, el suministro para el consumo poblacional e industrial de la ciudad de Chimbote.

La infraestructura principal de riego del Sistema Santa, incluye la bocatoma La Víbora, el canal Chimbote y el llamado canal Integrador, que permite la eliminación de las captaciones rústicas Santa y San Bartolo, cuyas áreas de influencia serán atendidas directamente por la captación La Víbora.

La bocatoma La Víbora, se encuentra ubicada en la cota 120 msnm del cauce del río Santa y cuenta con una arquitectura hidráulica que permite derivar un caudal de hasta 12 m<sup>3</sup>/s y evacuar por el río un caudal de avenidas de hasta 3,000 m<sup>3</sup>/s, mediante una estructura mixta (aliviadero de compuertas, barraje fijo y dique de cierre), que cubren todo el ancho del cauce.

El canal Chimbote, se inicia en la bocatoma La Víbora, tiene una longitud de 23.63 Km y una capacidad de conducción variable entre 10 y 2 m<sup>3</sup>/s. Su construcción hasta el Km 13.2 ha estado a cargo del P.E Chinecas y a la fecha se ha concluido el tramo restante. El canal Integrador Chimbote- Santa-San Bartolo, no se encuentra actualmente operativo, ya que su construcción, iniciada desde hace más de 10 años, ha sido paralizada por falta de recursos. El canal, de 17.28 Km de longitud, se encuentra concluido entre las progresivas 2+450 – 5+316, motivo por el cual el Sistema La Víbora viene funcionando con las dos bocatomas rústicas de Santa y San Bartolo, con las cuales se atienden 2,470 ha, es decir un 37% del área total del Sistema. Por tanto, el sistema La Víbora, cuenta además con 451 Km de canales de primer a quinto orden, de los cuales 170 Km se encuentran revestidos.

### **3.3 MATERIALES**

Los materiales necesarios a utilizar en el presente trabajo de investigación se detallan a continuación:

#### **3.3.1 Información de la data hidrométrica**

La data para la presente investigación se recopilará de la central de información de la página web: Proyecto Especial Chavimochic, del compendio titulado “Chavimochic en Cifras 2000 - 2010” el cual nos proporciona datos de producción de agua potable, generación de energía eléctrica, información estadística, meteorológica, sedimentos y caudal a nivel mensual de un registro de 1950 – 2010 (P.E. Chavimochic 2012).

Así mismo la información que corresponde a los caudales históricos de los ríos Nepeña, Casma y Sechin, serán proporcionados por la Autoridad Nacional del Agua en su compendio “Recursos Hídricos en el Perú” 2010.

**Cuadro 3:** Red de Estaciones Hidrométricas

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Latitud S (°)</b>	<b>Longitud W (°)</b>	<b>Altitud (m.s.n.m)</b>	<b>Unidad Hidrográfica</b>	<b>Río</b>	<b>Longitud Registro</b>
EH-01	Salinar - Tambo	-7.40	-78.58	350	Chicama	Chicama	61
EH-02	Quirihuac - Moche	-8.08	-78.87	200	Moche	Moche	61
EH-03	Huacapongo-Sifón Viru	-8.37	-78.67	280	Virú	Virú	61
EH-04	Chorobal - Huamanzaña	-8.47	-78.57	267	Huamanzaña	Chao	55
EH-05	Condorcerro	-8.65	-78.25	450	Santa	Santa	55
EH-06	San Jacinto	-9.16	-78.25	300	Nepeña	Nepeña	42
EH-07	Sector Tutuma	-9.43	-78.22	200	Casma	Casma	29
EH-08	Puente Quillo	-9.33	-78.13	410	Casma	Sechin	29

Fuente: P.E. Chavimochic (2012), ANA - Autoridad Nacional del Agua (2010).

### **3.3.2 Información del acuífero de Chao**

La información básica utilizada para el desarrollo del presente trabajo de investigación fue facilitada en clase del curso de “Flujos en Medios Porosos” de la Escuela de Post Grado – UNALM, y del “Inventario y Evaluación de las Fuentes de Agua Subterránea del Valle de Chao” desarrollado por la Autoridad Nacional del Agua, esta información se encuentra en el Anexo 2, (ANA - Autoridad Nacional del Agua 1998).

- Topografía de la superficie de terreno, basamento rocoso.
- Rendimiento específico, Permeabilidades, Almacenamiento.
- Cantidad de pozos de bombeo actuales.
- Hidrograma de los pozos de observación.
- Áreas de cultivo actual.

### **3.3.3 Información de estudios anteriores**

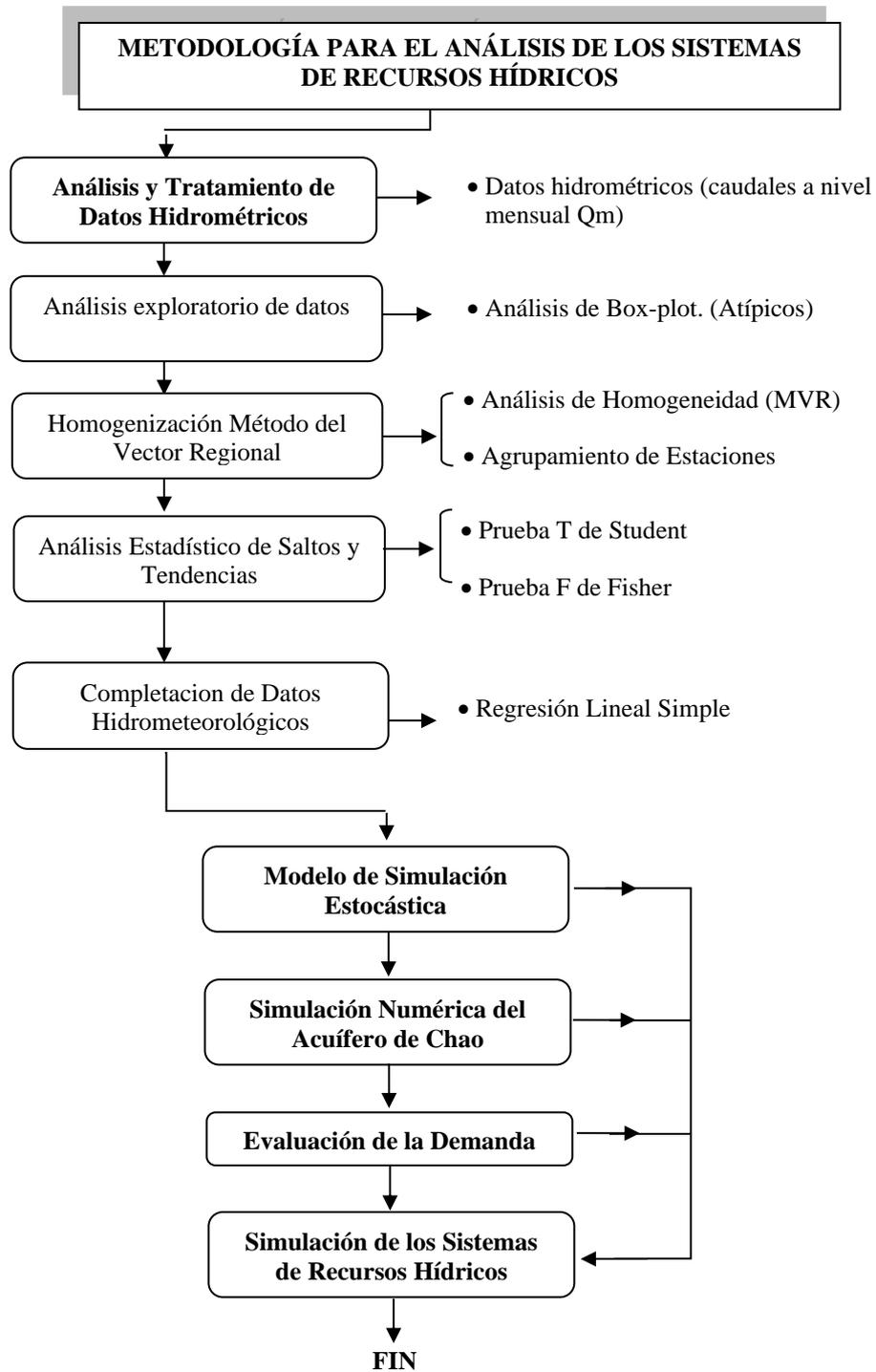
La información básica utilizada para el desarrollo del presente trabajo de investigación fue del Informe Técnico N°019-2012 Estudio a nivel Perfil “Adecuación del Proyecto Original Chincas al Esquema Reestructurado”, Estudio de Factibilidad 1990 “Embalse Palo Redondo” Consorcio Chimú, Estudio de Factibilidad 2010 “Proyecto Chavimochic Tercera Etapa”

### **3.3.4 Programas**

- Minitab v15, permite el análisis exploratorio de la información hidrométrica a escala mensual, estacional y anual.
- Hydraccess v4.2, permite la creación y organización en una base de datos hidrométricos en Microsoft Access para la sistematización de los datos recopilados, este software se encuentra disponible en forma gratuita.
- ArcGis v.10.1, con las extensiones 3D Análisis, spatial analysis. Se elaboró las presentaciones de mapas y otros gráficos que representen el objetivo de la investigación a un nivel espacial.
- SAMS, (stochastic analysis, modeling, and simulation) simulación estocástica de series de tiempo de los recursos hídricos en general y series de tiempo hidrológicas en particular, se ha usado ampliamente durante varias décadas para varios problemas relacionados al planeamiento y dirección de sistemas de recursos hídricos.
- MODFLOW, es un algoritmo público utilizado para simular el flujo de agua subterráneo que permite la modelación de acuíferos libres y confinados en una, dos o tres dimensiones en régimen permanente y transitorio, y es uno de los más ampliamente utilizados.
- WEAP, es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas.

### 3.4 METODOLOGÍA

El procedimiento metodológico general desarrollado posee la siguiente secuencia:



**Figura 5:** Proceso metodológico para el Análisis de Sistemas de Recursos Hídricos.

### **3.4.1 Análisis y tratamiento de la información hidrométrica**

#### **a. Análisis exploratorio de datos**

Las series de caudales fueron analizadas cualitativamente mediante un análisis exploratorio de datos (AED), que nos ayuda a detectar posibles errores o inconsistencia en los datos de partida, en este proceso se elaboraron los diagramas de cajas (Box plot) para tener una primera aproximación del comportamiento hidrológico en las estaciones (calidad de datos).

El AED realiza una visión general de todos los datos a ser analizados, detectando posibles datos atípicos (outliers) dentro de la muestra, estos datos (outliers), serán contrastado conociendo su fecha de ocurrencia y el evento que los produjo, realizando una comparación con las estaciones hidrométricas vecinas; de aquí se pone en juico la posible presencia de datos atípicos, en base a este análisis se considera su posible eliminación o inclusión en la siguiente etapa del análisis para no alterar la muestra.

#### **b. Homogenización de Estaciones Método del Vector Regional**

El Método del Vector Regional (MVR) consiste en elaborar, a partir de la información disponible, una estación ficticia que sea representativa de toda la zona de análisis, donde luego para cada estación se calcula un promedio extendido sobre todo el período de estudio, y para cada año, se calcula un índice. A esta serie de índices anuales se le llama Vector Regional, ya que toma en cuenta la información de una región que es climáticamente homogénea.

Las estaciones seleccionadas según el MVR, se agruparon en regiones con un comportamiento similar, las mismas que deben contar con un alto índice de correlación con el Vector.

Este método permite representar la información pluviométrica regional bajo la forma de índices anuales representativos de las precipitaciones en esa región y por coeficientes característicos de cada punto de observación.

Se elaboraron dos métodos para el cálculo del Vector Regional, uno propuesto por G. Hiez y otro por Y. Brunet Moret.

El método de G. Hiez está basado en el cálculo de la moda, mientras que el de Brunet Moret se basa en el promedio, eliminando los valores demasiado alejados del promedio.

Este método también puede aplicarse a datos mensuales, tratando separadamente cada uno de los meses del año como si se tratara de un valor anual.

Una vez elaborado el vector regional, el análisis de la información se facilita enormemente, así se puede:

- Evaluar la calidad de los datos de una estación por curvas de dobles acumuladas con los índices del vector regional.
- Analizar gráficamente y correlacionar los datos de una estación con los índices del vector regional.

### **c. Análisis Estadístico de Saltos y Tendencias**

Las tendencias son componentes determinísticas transitorias que se definen como un cambio sistemático y continuo sobre una muestra de información hidrometeorológica en cualquier parámetro de la misma, que afecta las distribuciones y dependencias de las series (Aliaga 1982).

Los saltos son formas determinísticas transitorias que permiten a una serie hidrológica periódica o no periódica pasar desde un estado a otro, como respuesta a cambios hechos por el hombre debido al continuo desarrollo de los recursos hídricos en la cuenca o a cambios naturales que pueden ocurrir (Aliaga 1985), ejemplo: deficiencia y error en la toma de datos de las estaciones hidrométricas, cambio de la ubicación de la estación, cambio en la posición de la instrumentación de recopilación de datos.

### **d. Completación de datos Hidrometeorológicos**

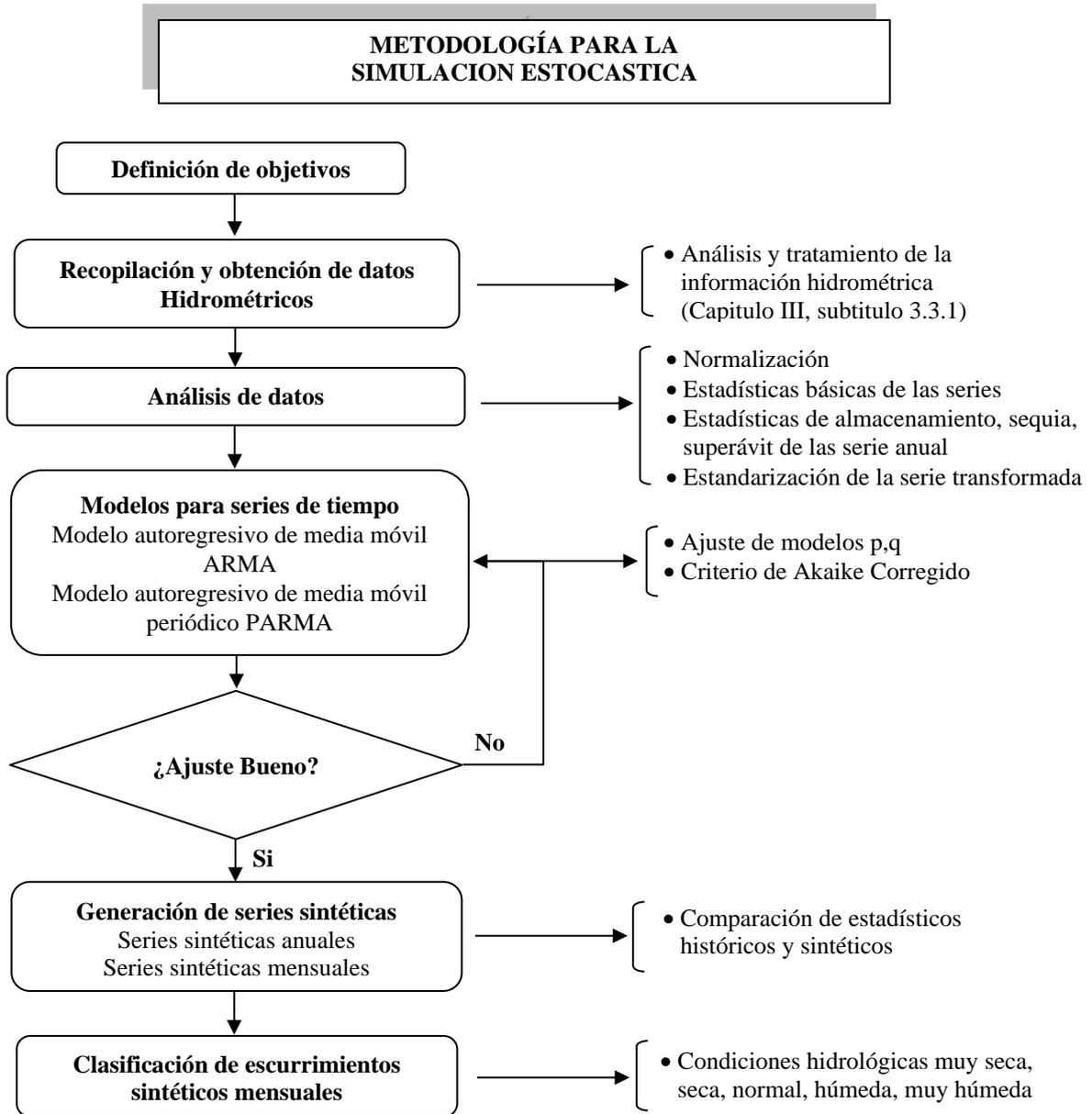
Un método muy utilizado cuando tenemos información faltante es el análisis de correlación, si disponemos de dos series de datos emparejadas, con frecuencia es útil conocer si ambas variables están relacionadas, y, en caso afirmativo, encontrar la expresión que refleja dicha relación.

Si la ecuación que mejor relaciona dichas variables es la de una recta, decimos que existe correlación lineal

Le llamamos recta de regresión a la recta que atraviesa la nube de puntos y que mejor se ajusta a ellos. Supongamos que medimos la distancia vertical de cada punto a la recta, la recta buscada sería aquella para la que la suma de estas distancias fuera mínima.

### 3.4.1 Modelo de simulación estocástica

El procedimiento metodológico desarrollado posee la siguiente secuencia:



**Figura 6:** Proceso metodológico para simulación estocástica.

En el modelo estocástico para las Cuencas de los Proyectos Chavimochic y Chincas se utilizan principalmente cuatro menús del software hidrológico SAMS 2009. El menú de análisis de datos “Data Analysis”, es en donde se analizan los datos de entrada y se realiza la transformación de los datos de entrada a funciones de probabilidad normal.

El segundo menú es el de selección del modelo estocástico “Model Fitting”. En este menú se selecciona el paso de tiempo para el modelo estocástico (mensual o anual), así como el tipo de modelo (Univariado, multivariado, descomposición espacial o temporal).

El tercer menú se refiere a los parámetros del modelo estocástico utilizado “Fitted Model”, en este menú se muestran los parámetros utilizados para el modelo estocástico utilizado.

Finalmente, el cuarto menú utilizado, “Generate Series” es el menú que se utiliza para generar las series de escurrimientos sintéticos basados en el modelo estocástico seleccionado y en las transformaciones hechas a los datos de entrada.

#### **a. Análisis de datos**

El análisis de la información es una actividad previa para la identificación y el ajuste de los modelos. Mediante este análisis se puede observar gráficamente el comportamiento de la serie de tiempo, las transformaciones iniciales a los datos, los principales estadísticos de la serie de tiempo y las correlaciones entre las distintas series o autocorrelaciones de la serie misma, en este proceso se elaboraron:

- Normalización
- Estadísticas básicas de las series
- Estadísticas de almacenamiento, sequía superávit de las series
- Estandarización de la serie transformada

#### **b. Modelos para series de tiempo**

La generación de series sintéticas ayuda a determinar el riesgo (confiabilidad) que existe, por citar un caso en el abastecimiento de agua a los sistemas de irrigación, es decir establece los rangos de confiabilidad en un balance hídrico.

Por otro lado la predicción de series hidrológicas futuras son necesarias para determinar por ejemplo el planeamiento de un reservorio a corto plazo.

El ajuste del modelo no es más que la determinación de los parámetros del mismo, y como punto final de la modelación sería la comprobación de la bondad de ajuste.

Por lo tanto cuando existan múltiples modelos que hayan pasado las pruebas de las suposiciones iniciales, se puede aplicar otro enfoque muy utilizado como el criterio de información de Akaike corregido (Hurvich y Tsai 1989), el mismo que es derivado del criterio de información de Akaike (Akaike 1974). Los dos se basan en una penalización de los modelos con mayor número de parámetros.

Los modelos que se han aplicado para las series de tiempo del presente estudio son los modelos autoregresivos de media móvil ARMA(p,q) para series anuales y los modelos modelos autoregresivos de media móvil periódicos para series mensuales conocido como PARMA (p, q).

- Modelo autoregresivo de media móvil (ARMA)
- Modelo autoregresivo de media móvil periódico (PARMA)

#### **c. Generación de series sintéticas**

Terminada la parte de ajustes de parámetros a los diferentes modelos ARMA (p,q), PARMA (p,q), el programa SAMS realiza la generación de series sintéticas en función a los parámetros calculados.

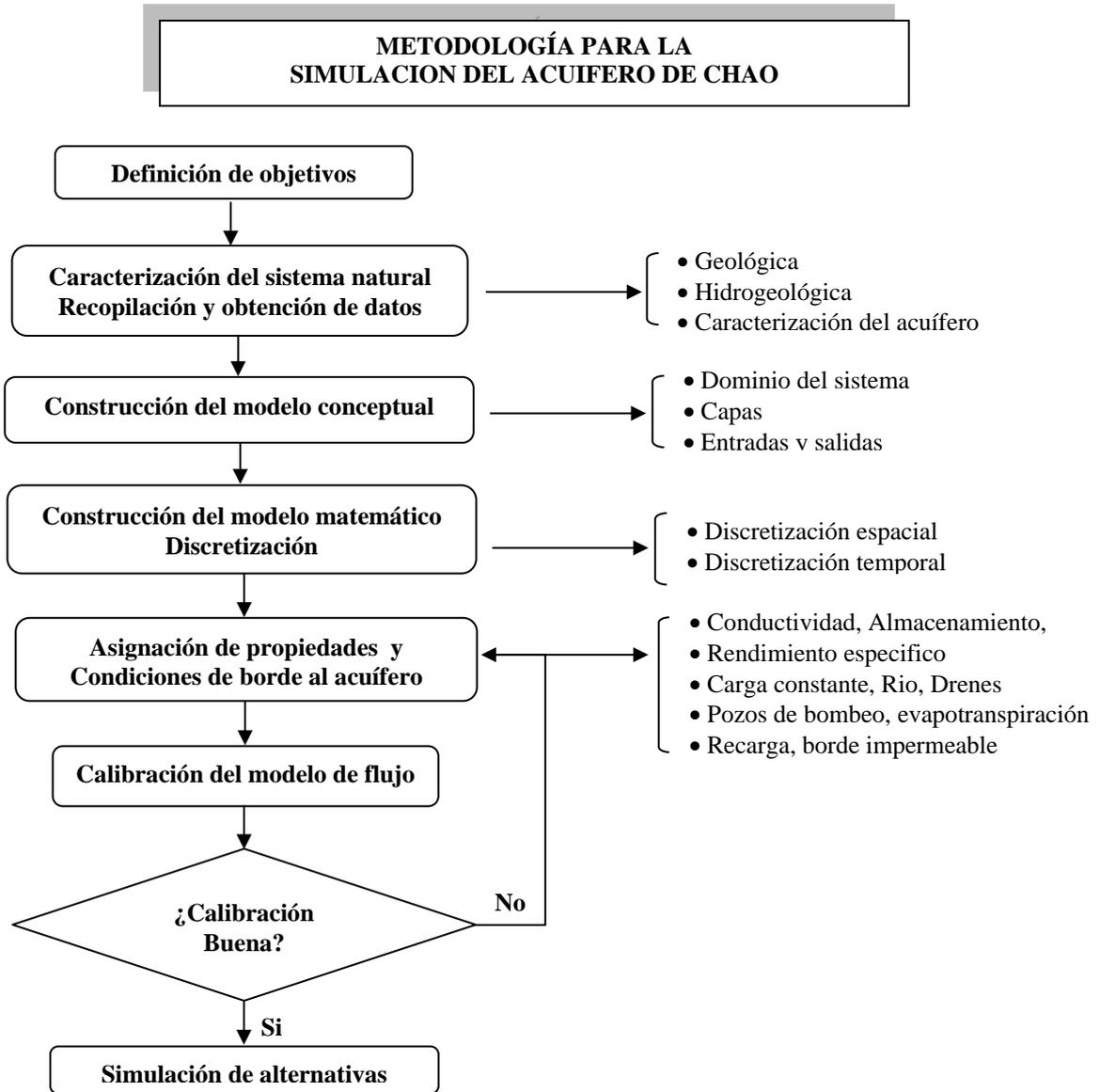
- Series sintéticas anuales
- Series sintéticas mensuales

#### **d. Clasificación de escurrimientos sintéticos mensuales**

Se generará 1,000 series con escurrimientos sintéticos, cada una para un periodo de 50 años, los cuales han sido generados estocásticamente. Estas series representan diferentes realizaciones de escurrimientos durante este periodo.

### 3.4.2 Simulación Numérica del acuífero de Chao

El procedimiento metodológico desarrollado posee la siguiente secuencia:



**Figura 7:** Proceso metodológico para simulación del acuífero de Chao.

En esta investigación se ha empleado la aplicación Visual Modflow 3.0 para el estudio de la modelización del flujo en el área de estudio, versión que ha sido desarrollada en el año 2002 por Waterloo Hydrogeologic Inc. compañía líder en el desarrollo de aplicaciones informáticas para el estudio, análisis, interpretación, gestión y protección de acuíferos

Simulamos el flujo de agua subterránea, y sometimos al sistema simulado a un estrés determinado (bombeos, etc) para luego predecir el resultado, con lo cual obtuvimos las diferentes opciones disponibles para solución óptima.

#### **a. Caracterización del sistema natural**

Para realizar la simulación se recopilaron y obtuvieron los datos necesarios para la caracterización del sistema. Así pues, debe obtenerse una visión tridimensional de la zona de estudio, caracterizando en el espacio y en el tiempo los parámetros geológicos, hidrogeológicos e hidrodinámicos (permeabilidad, transmisividad, coeficientes de almacenamiento, porosidad efectiva, elevaciones del agua subterránea, direcciones de flujo, cantidad de pozos, hidrogramas etc). La información a detalle se encuentra en el Anexo 2.

#### **b. Construcción del modelo conceptual**

Una vez caracterizada la zona de estudio, se puede llevar a cabo el modelo conceptual. Éste sirve para simplificar el problema de campo, organizar los datos de campo y facilitar la solución del problema. En el modelo conceptual del acuífero de Chao se contempla la definición de las unidades hidroestratigráficas, la esquematización del balance de agua y la definición del sistema de flujo.

En el modelo conceptual de flujo se han establecido los siguientes aspectos:

- Dominio del sistema
- Capas del acuífero
- Entradas y salidas de agua del sistema

#### **c. Construcción del modelo matemático**

Una vez establecido el modelo conceptual, la siguiente etapa es la implementación de ese modelo en un modelo matemático que simule el comportamiento real del acuífero.

En el modelo matemático de flujo se han establecido los siguientes aspectos:

- Discretización: diseño de la malla del modelo
- Asignación de propiedades del acuífero
- Asignación de las condiciones de borde

#### **d. Calibración del modelo de flujo**

La calibración es el proceso de modificación de los parámetros de entrada del modelo hasta que los resultados del mismo corresponden razonablemente con las condiciones reales del sitio (Waterloo Hydrogeologic 2002).

- Condiciones de ejecución del modelo de flujo.
- Método de calibración del modelo de flujo.
- Régimen de simulación de flujo.
- Análisis de calibración.

#### **e. Escenarios de manejo del acuífero**

Las series de caudales fueron analizadas cualitativamente

- Escenario 1: Situación actual
- Escenario 2: Ampliación – Áreas Nuevas
- Escenario 3: Factibilidad
- Escenario 4: Recursos propios
- Escenario 5: Solo agua subterránea

### **3.4.3 Evaluación de la demanda**

La información que contiene el detalle de la demanda en los proyectos Chavimochic y Chincas se obtuvo del Estudio de Factibilidad 2010 “Proyecto Chavimochic Tercera Etapa” y del Estudio de Perfil 2012 “Adecuación del Proyecto Original Chincas al Esquema Reestructurado”.

### a. Proyecto Especial Chinecas

Según P.E. Chinecas (2012), a continuación se presentan las siguientes demandas:

- Demanda actual

Teniendo en cuenta la cedula promedio de los valles, se ha determinado que los consumos hídricos promedios están alrededor de los 1,021 Hm<sup>3</sup>, con consumos promedios de 65 mmc, en las áreas nuevas vendidas, 256.05 Hm<sup>3</sup> en las áreas posesionadas, 626 Hm<sup>3</sup> del valle Santa - Lacramarca, 49.35 Hm<sup>3</sup> en las áreas de Nepeña, 24.65 Hm<sup>3</sup> en las áreas de Casma y 24.19 Hm<sup>3</sup> para uso Poblacional el cual beneficiará a los distritos pertenecientes a la Provincia de Santa:

Santa (18,010.00 habitantes, Tasa de crecimiento anual de 1.31%), Chimbote (215,817.00 habitantes, Tasa de crecimiento anual de 1.00%), Nuevo Chimbote (113,166.00 habitantes, Tasa de crecimiento anual de 1.6%), Samanco (4,218.00 habitantes, Tasa de crecimiento anual de 0.70%) y Nepeña (13,860.00 habitantes, Tasa de crecimiento anual de 1.13%); y a la Provincia de Casma: Casma (28,831.00 habitantes, Tasa de crecimiento anual de 1.3%), Comandante Noel (2,029.00 habitantes, Tasa de crecimiento anual de 0.20%), Buena Vista (3,937.00 habitantes, Tasa de crecimiento anual de 0.35%).

**Cuadro 4:** Eficiencias de riego actual en las áreas del valle viejo

Sector	Eficiencia Conducción	Eficiencia Distribución	Eficiencia Aplicación	Eficiencia Riego
Santa	90.00%	89.00%	33.00%	26.43%
Lacramarca	93.00%	93.00%	33.00%	28.54%
Nepeña	91.00%	83.00%	45.00%	33.99%
Casma	92.00%	86.00%	47.00%	37.19%
Promedio	91.50%	87.75%	39.50%	31.54%

Fuente: P.E. Chinecas (2011).

- Demanda futura

El Proyecto Chinecas, tanto en su concepción original como en el planteamiento reestructurado, considera beneficiar a tierras agrícolas en producción (mejoramiento) y la incorporación de tierras eriazas. En este último, las “tierras nuevas” corresponden una superficie de 33,053.50 ha, de la cual 17,733.50 ha se ubican en el intervale Santa-Lacramarca, 3,790 ha en el intervale de Nepeña y 11,530 ha en el intervale de Casma.

Como se ha indicado anteriormente, además de las áreas de ampliación de la frontera agrícola en los intervalles, el proyecto beneficia también a los terrenos agrícolas localizados en los valles de Santa- Lacramarca, Nepeña y Casma que se encuentran en niveles dominados por el Canal Principal mejorando sus dotaciones de agua, especialmente en los períodos de estiaje de sus ríos que como sabemos tienen aportes mínimos o nulos.

En el valle de Santa-Lacramarca, el área a beneficiar abarca 18 411.50, en Nepeña, el área de beneficio abarca un área de 7 050 ha (5 970 ha en la margen derecha y 1 080 ha en la izquierda del río) y en el valle de Casma 3 522 ha (2 050 ha en la margen derecha y 1 472 ha en la izquierda del río).

**Cuadro 5:** Eficiencias de riego en las áreas a mejorar

Sector	Área de riego (ha)	Eficiencia Riego
Santa - Lacramarca	18412.0	46.00%
Nepeña	7050.0	50.00%
Casma - Sechin	3522.0	50.00%

Fuente: P.E. Chincas (2012).

**Cuadro 6:** Eficiencias de riego en las áreas nuevas de incorporación

Sector	Área de riego (ha)	Eficiencia Riego
Intervalle Santa - Lacramarca	17773.5	87.50%
Intervalle Nepeña	3790.0	87.50%
Intervalle Casma - Sechin	11530.0	87.50%

Fuente: P.E. Chincas (2012).

**Cuadro 7: Demanda actual Chinecas en Hm<sup>3</sup>**

DESCRIPCION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Nº DIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
<b>SANTA - LACRAMARCA</b>													
<b>IRCHIM</b>													
Area (ha)	659.77	594.34	610.69	556.17	583.43	496.19	610.69	599.79	637.96	539.81	599.79	659.77	7148.40
(Hm3)	22.43	20.21	20.76	18.91	19.84	16.87	20.76	20.39	21.69	18.35	20.39	22.43	243.05
<b>CARLOS LEIGTH</b>													
Area (ha)	423.05	381.09	391.58	356.62	374.10	318.16	391.58	384.59	409.06	346.13	384.59	423.05	4583.60
(Hm3)	14.38	12.96	13.31	12.13	12.72	10.82	13.31	13.08	13.91	11.77	13.08	14.38	155.84
<b>CHIMBOTE/SANTA/SAN BARTOLO</b>													
Area (ha)	616.54	555.39	570.68	519.73	545.20	463.68	570.68	560.49	596.16	504.44	560.49	616.54	6680.00
(Hm3)	20.96	18.88	19.40	17.67	18.54	15.77	19.40	19.06	20.27	17.15	19.06	20.96	227.12
Sub-Total (Hm3)	57.78	52.05	53.48	48.71	51.09	43.45	53.48	52.53	55.87	47.27	52.53	57.78	626.01
<b>AREAS NUEVAS VENDIDAS</b>													
Area (ha)	600.39	540.84	555.73	506.11	530.92	451.53	555.73	545.80	580.54	491.22	545.80	600.39	6505.00
(Hm3)	6.00	5.41	5.56	5.06	5.31	4.52	5.56	5.46	5.81	4.91	5.46	6.00	65.05
<b>AREAS POSESIONARIOS</b>													
Area (ha)	787.75	709.62	729.15	664.05	696.60	592.44	729.15	716.13	761.70	644.52	716.13	787.75	8535.00
(Hm3)	23.63	21.29	21.87	19.92	20.90	17.77	21.87	21.48	22.85	19.34	21.48	23.63	256.05
<b>NEPEÑA</b>													
Area (ha)	888.05	712.19	776.83	706.46	575.64	384.55	376.14	410.75	450.87	412.14	494.64	861.73	7050.00
(Hm3)	6.22	4.99	5.44	4.95	4.03	2.69	2.63	2.88	3.16	2.88	3.46	6.03	49.35
<b>TOTAL RIEGO</b>	<b>63.99</b>	<b>57.03</b>	<b>58.92</b>	<b>53.65</b>	<b>55.12</b>	<b>46.14</b>	<b>56.11</b>	<b>55.40</b>	<b>59.02</b>	<b>50.16</b>	<b>55.99</b>	<b>63.81</b>	<b>996.46</b>
<b>OTRAS DEMANDAS</b>													
Descripción	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
<b>USO POBLACIONAL</b>													
Poblacion Santa Lacramarca	5.17	4.67	5.17	5.00	5.17	5.00	5.17	5.17	5.00	5.17	5.00	5.17	60.86
Poblacional Nepeña	0.11	0.10	0.11	0.10	0.11	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.11	1.26
Sub-Total (Hm3)	5.28	4.77	5.28	5.11	5.28	5.11	5.28	5.28	5.11	5.28	5.11	5.28	62.13
<b>USUARIOS AGUAS ARRIBA DE CHINECAS</b>													
Usuarios Tablones (Toma Tablones)	0.54	0.48	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	6.31
Usuarios Suchimán (Toma Suchimán)	0.80	0.73	0.80	0.78	0.80	0.78	0.80	0.80	0.78	0.80	0.78	0.80	9.46
Usuarios 47 (Toma 47)	0.54	0.48	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	6.31
Usuarios Río	0.54	0.48	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	6.31
Pérdidas (5%)	3.75	3.39	3.48	3.11	3.21	2.85	2.95	2.95	3.11	3.75	3.63	3.75	39.93
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	6.16	5.56	5.89	5.44	5.62	5.18	5.36	5.36	5.44	6.16	5.96	6.16	68.31
<b>Total Otras Demandas</b>	<b>11.44</b>	<b>10.33</b>	<b>11.17</b>	<b>10.55</b>	<b>10.90</b>	<b>10.29</b>	<b>10.63</b>	<b>10.63</b>	<b>10.55</b>	<b>11.44</b>	<b>11.07</b>	<b>11.44</b>	<b>130.43</b>
<b>CAUDAL ECOLOGICO</b>													
Descripción	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Nº DIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
<b>RIO SANTA</b>													
Caudal m3/s	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	60.00
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	13.39	12.10	13.39	12.96	13.39	12.96	13.39	13.39	12.96	13.39	12.96	13.39	157.68
<b>RIO NEPEÑA</b>													
Caudal m3/s	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	1.80
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	0.40	0.36	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	4.73
<b>Total Caudal Ecologicos</b>	<b>13.79</b>	<b>12.46</b>	<b>13.79</b>	<b>13.35</b>	<b>13.79</b>	<b>13.35</b>	<b>13.79</b>	<b>13.79</b>	<b>13.35</b>	<b>13.79</b>	<b>13.35</b>	<b>13.79</b>	<b>162.41</b>

**Cuadro 8: Demanda Futura Chinecas en Hm<sup>3</sup>**

Descripción	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
N° DIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
<b>SANTA - LACRAMARCA</b>													
<b>Áreas de mejoramiento (ha)</b>													
<b>IRCHIM</b>													
Area (ha)	890.94	785.09	846.43	742.98	496.45	341.07	317.69	374.27	393.30	512.07	633.11	815.00	7148.40
(Hm3)	19.76	17.41	18.77	16.48	11.01	7.57	7.05	8.30	8.72	11.36	14.04	18.08	158.56
<b>CARLOS LEIGHT</b>													
Area (ha)	571.28	503.41	542.74	476.40	318.33	218.69	203.71	239.98	252.19	328.34	405.96	522.58	4583.60
(Hm3)	12.67	11.17	12.04	10.57	7.06	4.85	4.52	5.32	5.59	7.28	9.00	11.59	101.67
<b>CHIMBOTE/SANTA/SAN BARTOLO</b>													
Area (ha)	832.56	733.65	790.97	694.29	463.92	318.72	296.88	349.75	367.53	478.51	591.63	761.59	6680.00
(Hm3)	18.47	16.27	17.54	15.40	10.29	7.07	6.59	7.76	8.15	10.61	13.12	16.89	148.17
(Hm3)	50.90	44.85	48.36	42.45	28.36	19.49	18.15	21.38	22.47	29.25	36.17	46.56	408.40
<b>Áreas Nuevas (ha)</b>													
Area (ha)	2215.20	1952.02	2104.53	1847.30	1234.36	848.02	789.90	930.57	977.88	1273.18	1574.15	2026.38	17773.50
(Hm3)	26.58	23.42	25.25	22.17	14.81	10.18	9.48	11.17	11.73	15.28	18.89	24.32	213.28
Sub-Total (Hm3)	77.48	68.28	73.61	64.61	43.18	29.66	27.63	32.55	34.20	44.53	55.06	70.88	621.68
<b>NEPEÑA</b>													
<b>Áreas de mejoramiento (ha)</b>													
(Hm3)	17.50	14.03	15.31	13.92	11.34	7.58	7.41	8.09	8.88	8.12	9.75	16.98	138.91
Area (ha)	888.05	712.19	776.83	706.46	575.64	384.55	376.14	410.75	450.87	412.14	494.64	861.73	7049.99
<b>Áreas Nuevas (ha)</b>													
Area (ha)	477.40	382.87	417.62	379.79	309.46	206.73	202.21	220.81	242.39	221.56	265.91	463.26	3790.00
(Hm3)	5.73	4.59	5.01	4.56	3.71	2.48	2.43	2.65	2.91	2.66	3.19	5.56	45.48
Sub-Total (Hm3)	23.23	18.63	20.32	18.48	15.06	10.06	9.84	10.74	11.79	10.78	12.94	22.54	184.39
<b>CASMA - SECHIN</b>													
<b>Áreas de mejoramiento (ha)</b>													
(Hm3)	7.78	6.46	7.12	6.76	4.03	3.35	3.21	3.31	3.30	4.50	4.79	7.63	62.22
Area (ha)	440.35	365.84	402.76	382.46	227.83	189.40	181.65	187.51	186.59	254.47	271.26	431.85	3521.97
<b>Áreas Nuevas (ha)</b>													
Area (ha)	1441.59	1197.65	1318.52	1252.08	745.86	620.05	594.67	613.87	610.84	833.05	888.04	1413.76	11530.00
(Hm3)	17.30	14.37	15.82	15.02	8.95	7.44	7.14	7.37	7.33	10.00	10.66	16.97	138.36
Sub-Total (Hm3)	25.08	20.84	22.94	21.78	12.98	10.79	10.35	10.68	10.63	14.49	15.45	24.59	200.58
<b>Total Riego (Hm3)</b>	<b>125.79</b>	<b>107.74</b>	<b>116.87</b>	<b>104.87</b>	<b>71.21</b>	<b>50.51</b>	<b>47.81</b>	<b>53.97</b>	<b>56.62</b>	<b>69.80</b>	<b>83.45</b>	<b>118.01</b>	<b>1,006.65</b>
<b>OTRAS DEMANDAS</b>													
Descripción	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
<b>USO POBLACIONAL</b>													
Poblacion Santa Lacramarca	8.67	7.83	8.67	8.39	8.67	8.39	8.67	8.67	8.39	8.67	8.39	8.67	102.09
Poblacional Nepeña	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	1.80
Poblacional Casma	0.55	0.49	0.55	0.53	0.55	0.53	0.55	0.55	0.53	0.55	0.53	0.55	6.43
Sub-Total (Hm3)	9.37	8.46	9.37	9.07	9.37	9.07	9.37	9.37	9.07	9.37	9.07	9.37	110.32
<b>USUARIOS AGUAS ARRIBA DE CHINECAS</b>													
Usuarios Tablones (Toma)	0.54	0.48	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	6.31
Usuarios Suchimán (Toma)	0.80	0.73	0.80	0.78	0.80	0.78	0.80	0.80	0.78	0.80	0.78	0.80	9.46
Usuarios 47 (Toma 47)	0.54	0.48	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	6.31
Usuarios Río	0.54	0.48	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	0.54	0.52	0.54	0.52	0.54	6.31
Pérdidas (5%)	3.75	3.39	3.48	3.11	3.21	2.85	2.95	2.95	3.11	3.75	3.63	3.75	39.93
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	6.16	5.56	5.89	5.44	5.62	5.18	5.36	5.36	5.44	6.16	5.96	6.16	68.31
<b>Total Otras Demandas</b>	<b>6.71</b>	<b>6.06</b>	<b>6.44</b>	<b>5.97</b>	<b>6.17</b>	<b>5.71</b>	<b>5.90</b>	<b>5.90</b>	<b>5.97</b>	<b>6.71</b>	<b>6.49</b>	<b>6.71</b>	<b>178.63</b>
<b>CAUDAL ECOLOGICO</b>													
Descripción	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
N° DIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
<b>RIO SANTA</b>													
Caudal m3/s	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	60.00
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	13.39	12.10	13.39	12.96	13.39	12.96	13.39	13.39	12.96	13.39	12.96	13.39	157.68
<b>RIO NEPEÑA</b>													
Caudal m3/s	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	1.80
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	0.40	0.36	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	4.73
<b>RIO CASMA</b>													
Caudal m3/s	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	3.00
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	0.67	0.61	0.67	0.65	0.67	0.65	0.67	0.67	0.65	0.67	0.65	0.67	7.89
<b>RIO SECHIN</b>													
Caudal m3/s	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.60
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	1.58
<b>Total Caudal Ecologicos</b>	<b>14.60</b>	<b>13.19</b>	<b>14.60</b>	<b>14.13</b>	<b>14.60</b>	<b>14.13</b>	<b>14.60</b>	<b>14.60</b>	<b>14.13</b>	<b>14.60</b>	<b>14.13</b>	<b>14.60</b>	<b>171.88</b>

## b. Proyecto Especial Chavimochic

Según P.E. Chavimochic (2010) a continuación se presentan las siguientes demandas:

- Demanda actual

Cabe señalar que actualmente en las épocas de estiaje, el sistema Chavimochic opera en condiciones restringidas, lo cual ha contribuido a mejorar ligeramente la eficiencia de riego en el sistema; sin embargo, el principal impacto ha sido el de limitar las áreas de siembra en esta época (cultivos transitorios), disminuyendo la intensidad del uso actual de la tierra principalmente en las áreas de mejoramiento, mientras que en las áreas nuevas condiciona la instalación de nuevas siembras principalmente de cultivos permanentes (espárrago, palto, caña de azúcar, etc.).

**Cuadro 9:** Eficiencia de riego actual de los valles Chao, Virú y Moche

Sector	Eficiencia Conducción	Eficiencia Distribución	Eficiencia Aplicación	Eficiencia Riego
Chao	95.00%	84.38%	60.00%	48.10%
Virú	95.00%	73.00%	55.00%	38.14%
Moche	95.00%	79.30%	55.00%	41.43%
Chicama	90.00%	85.60%	58.90%	45.38%
Promedio	93.75%	80.57%	57.23%	43.26%

Fuente: P.E. Chavimochic (2010).

- Demanda futura

**Agua potable Trujillo, Virú y Chao**, actualmente, según la Gerencia General de SEDALIB, la ciudad de Trujillo tiene una demanda media de 1.80 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 0.90 m<sup>3</sup>/s corresponde a la Planta de Tratamiento de Agua Potable del Proyecto Chavimochic y 0.90 m<sup>3</sup>/s a los pozos tubulares de SEDALIB.

Por otra parte, SEDALIB tiene en sus planes perforar tres nuevos pozos tubulares para abastecer a Trujillo, así como rehabilitar cinco pozos existentes que pueden extraer 0.60 m<sup>3</sup>/s adicionales. Las razones para no implementar mayor número de pozos, se deben a que el acuífero presenta en la actualidad problemas de contaminación salina y de nitratos en algunos sectores de la ciudad, como la zona litoral y el casco urbano.

Para la Primera Fase de la Tercera Etapa del Proyecto Chavimochic, se ha efectuado una proyección de la demanda de agua potable de Trujillo sólo hasta el año 2025, fecha en la cual deberá entrar a funcionar la Segunda Fase de la Tercera Etapa, que asciende a 3.50 m<sup>3</sup>/s, por lo que la demanda de agua incremental para fines domésticos o de uso poblacional fue estimada en 1.7 m<sup>3</sup>/s, de los cuales el PECH debe aportar 1.1 m<sup>3</sup>/s adicionales.

**Demandas para riego**, el cálculo de las demandas hídricas del Proyecto se ha definido principalmente mediante un análisis de los siguientes aspectos:

Características de los suelos del área del Proyecto por su influencia en la eficiencia del riego, teniendo en cuenta que con la implementación de sistemas de riego tecnificado, esa influencia es menor.

Características climatológicas del área del Proyecto para determinar la evapotranspiración de cada valle según el tipo de cultivo a instalar.

Uso consuntivo de los cultivos considerados en la cédula propuesta.

Los cultivos considerados en la tercera etapa como permanentes son, el esparrago, caña de azúcar, maracuyá, palto, vid, cítricos, higo, en cultivos transitorios tenemos la remolacha, sorgo, piquillo, paprika y maíz.

**Cuadro 10:** Eficiencia de riego futuro de los valles Chao, Virú y Moche

Sector	Eficiencia Conducción	Eficiencia Distribución	Eficiencia Aplicación	Eficiencia Riego
Chao	95.00%	86.80%	66.70%	55.00%
Virú	95.00%	82.00%	58.00%	45.18%
Moche	95.00%	80.00%	58.00%	44.08%
Chicama	95.00%	85.70%	60.00%	48.85%
Promedio	95.00%	83.63%	60.68%	48.28%

Fuente: P.E. Chavimochic (2010).

Las eficiencias de riego en las áreas nuevas para riego en los valles de Chao Virú, Moche y Chicama será del 85% de eficiencia.

**Cuadro 11: Demanda actual Chavimochic en Hm<sup>3</sup>**

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
<b>SECTOR DERIEGO</b>	<b>57.80</b>	<b>53.22</b>	<b>56.75</b>	<b>58.25</b>	<b>51.09</b>	<b>39.91</b>	<b>33.62</b>	<b>37.81</b>	<b>44.26</b>	<b>54.71</b>	<b>64.98</b>	<b>66.13</b>	<b>618.55</b>
<b>Valles Viejos</b>	<b>39.34</b>	<b>34.93</b>	<b>39.30</b>	<b>41.93</b>	<b>35.97</b>	<b>26.10</b>	<b>20.41</b>	<b>23.47</b>	<b>28.31</b>	<b>37.63</b>	<b>45.65</b>	<b>46.59</b>	<b>419.61</b>
Tanguche-Guadalupito	4.07	2.06	0.77	2.11	2.70	1.91	0.81	0.31	1.11	3.55	5.60	5.83	30.83
Chao	8.78	8.35	8.90	9.18	8.17	6.05	4.46	5.47	6.36	7.78	10.63	11.31	95.44
Virú	14.30	12.80	17.54	18.59	15.48	9.51	7.61	9.09	11.36	14.58	16.72	16.76	164.35
Moche	12.19	11.72	12.08	12.05	9.62	8.62	7.53	8.60	9.47	11.72	12.70	12.68	128.99
<b>Áreas Nuevas</b>	<b>18.46</b>	<b>18.30</b>	<b>17.46</b>	<b>16.32</b>	<b>15.12</b>	<b>13.81</b>	<b>13.22</b>	<b>14.34</b>	<b>15.96</b>	<b>17.08</b>	<b>19.33</b>	<b>19.55</b>	<b>198.94</b>
Sectores I, II, III y IV	18.46	18.30	17.46	16.32	15.12	13.81	13.22	14.34	15.96	17.08	19.33	19.55	198.94
<b>USO POBLACIONAL</b>	<b>5.10</b>	<b>5.35</b>	<b>4.96</b>	<b>4.96</b>	<b>4.79</b>	<b>4.56</b>	<b>4.67</b>	<b>4.38</b>	<b>4.75</b>	<b>4.56</b>	<b>4.81</b>	<b>4.85</b>	<b>57.72</b>
Poblacion Chao	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.39
Poblacion Virú	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.57
Poblacion Moche	5.01	5.26	4.88	4.88	4.71	4.48	4.59	4.31	4.67	4.48	4.73	4.77	56.76
<b>OTROS USOS</b>	<b>4.63</b>	<b>4.00</b>	<b>4.19</b>	<b>4.23</b>	<b>3.76</b>	<b>3.32</b>	<b>3.28</b>	<b>3.33</b>	<b>3.73</b>	<b>4.02</b>	<b>4.27</b>	<b>4.45</b>	<b>47.21</b>
Pecuarios y Otros	4.63	4.00	4.19	4.23	3.76	3.32	3.28	3.33	3.73	4.02	4.27	4.45	47.21
<b>DEMANDA TOTAL</b>	<b>67.53</b>	<b>62.57</b>	<b>65.90</b>	<b>67.44</b>	<b>59.64</b>	<b>47.78</b>	<b>41.57</b>	<b>45.52</b>	<b>52.74</b>	<b>63.28</b>	<b>74.06</b>	<b>75.43</b>	<b>723.48</b>

<b>CAUDAL ECOLOGICO</b>													
Descripción	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Nº DIAS	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
<b>RIO MOCHE</b>													
Caudal m <sup>3</sup> /s	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	4.80
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	1.07	0.97	1.07	1.04	1.07	1.04	1.07	1.07	1.04	1.07	1.04	1.07	12.61
<b>RIO VIRU</b>													
Caudal m <sup>3</sup> /s	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	1.80
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	0.40	0.36	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	4.73
<b>RIO CHAO</b>													
Caudal m <sup>3</sup> /s	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.60
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	0.13	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	1.58
<b>Total Caudal Ecologico:</b>	<b>1.61</b>	<b>1.45</b>	<b>1.61</b>	<b>1.56</b>	<b>1.61</b>	<b>1.56</b>	<b>1.61</b>	<b>1.61</b>	<b>1.56</b>	<b>1.61</b>	<b>1.56</b>	<b>1.61</b>	<b>18.93</b>

**Cuadro 12: Demanda Futura Chavimochic en Hm<sup>3</sup>**

Descripción	(ha)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL	
<b>I y II ETAPA</b>															
<b>Áreas de mejoramiento</b>															
Valle de Chao	6,672.69	6.58	6.29	6.89	7.24	6.45	4.68	3.34	4.09	4.84	5.95	8.13	8.60	73.07	
Valle de Viru	12,117.00	10.09	8.77	11.41	11.55	9.58	6.12	5.13	6.02	7.37	9.28	10.76	11.30	107.37	
Valle de Moche	7,425.08	7.57	7.29	7.76	8.01	6.38	5.54	4.71	5.46	6.02	7.58	8.34	8.19	82.85	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	26,214.76	24.24	22.36	26.06	26.79	22.40	16.34	13.17	15.57	18.23	22.81	27.23	28.09	263.29	
<b>Áreas Nuevas</b>															
Areas Nuevas Actuales	47,552.11	17.4	17.2	16.5	15.4	14.3	13.0	12.5	13.5	15.0	16.1	18.2	18.4	187.5	
Areas Nuevas Futuras		45.2	44.8	42.8	40.0	37.1	33.8	32.4	35.1	39.1	41.8	47.4	47.9	487.4	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	47,552.11	62.65	62.08	59.22	55.36	51.31	46.85	44.84	48.67	54.14	57.95	65.59	66.32	674.97	
<b>Total I y II ETAPA</b>		<b>86.89</b>	<b>84.44</b>	<b>85.29</b>	<b>82.15</b>	<b>73.71</b>	<b>63.19</b>	<b>58.01</b>	<b>64.24</b>	<b>72.36</b>	<b>80.76</b>	<b>92.82</b>	<b>94.40</b>	<b>938.26</b>	
<b>III ETAPA</b>															
<b>Áreas de mejoramiento</b>															
Valle de Chicama	153%	65,208.68	90.22	84.24	90.77	85.20	72.38	59.17	47.37	59.24	71.33	82.81	82.63	85.41	910.77
<b>Áreas Nuevas</b>															
Area Nueva Chicama	16,692.60	22.77	22.57	21.53	20.12	18.65	17.03	16.30	17.69	19.68	21.07	23.84	24.11	245.35	
Pampas de Urricape	10,000.00	12.57	13.67	13.95	13.58	11.19	9.39	9.56	10.67	11.70	13.11	13.70	14.44	147.53	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )		35.34	36.24	35.48	33.70	29.84	26.42	25.86	28.36	31.38	34.18	37.54	38.55	392.88	
<b>Total III ETAPA</b>		<b>112.99</b>	<b>106.81</b>	<b>112.30</b>	<b>105.32</b>	<b>91.03</b>	<b>76.20</b>	<b>63.67</b>	<b>76.93</b>	<b>91.01</b>	<b>103.87</b>	<b>106.48</b>	<b>109.52</b>	<b>1,303.65</b>	
<b>Otras Demandas PECH</b>															
<b>USO POBLACIONAL</b>															
Poblacion Chao		0.47	0.50	0.46	0.46	0.44	0.42	0.43	0.41	0.44	0.42	0.45	0.45	5.36	
Poblacion Viru		0.47	0.50	0.46	0.46	0.44	0.42	0.43	0.41	0.44	0.42	0.45	0.45	5.36	
Poblacion Moche		11.70	12.28	11.39	11.39	10.99	10.45	10.72	10.05	10.90	10.45	11.03	11.12	132.45	
Poblacion Chicama		1.81	1.64	1.81	1.75	1.81	1.75	1.81	1.81	1.75	1.81	1.75	1.81	21.35	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )		14.46	14.91	14.12	14.06	13.69	13.05	13.40	12.68	13.53	13.11	13.68	13.83	164.52	
<b>ADICIONAL A CENTRAL HIDROELECTRICA VIRU</b>															
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )		4.34	7.91	9.32	10.89	9.83	5.04	3.46	3.29	1.95	0.37	-	-	56.41	
(m <sup>3</sup> /s)		1.62	3.27	3.48	4.20	3.67	1.95	1.29	1.23	0.75	0.14	-	-	1.79	
<b>OTROS USOS</b>															
Tanguche-Guadalupe		4.07	2.06	0.77	2.11	2.70	1.91	0.81	0.31	1.11	3.55	5.60	5.83	30.83	
Otras Demandas PECH		2.85	2.57	2.85	2.75	2.85	2.75	2.85	2.85	2.75	2.85	2.75	2.85	33.52	
Caudal ecológico Palo Redondo		1.34	1.21	1.34	1.30	1.34	1.30	1.34	1.34	1.30	1.34	1.30	1.34	15.79	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )		8.26	5.84	4.96	6.16	6.89	5.96	5.00	4.50	5.16	7.74	9.65	10.02	80.14	
<b>Total Otras Demandas</b>		<b>12.60</b>	<b>13.75</b>	<b>14.28</b>	<b>17.05</b>	<b>16.72</b>	<b>11.00</b>	<b>8.46</b>	<b>7.79</b>	<b>7.11</b>	<b>8.11</b>	<b>9.65</b>	<b>10.02</b>	<b>301.07</b>	
<b>CAUDAL ECOLOGICO</b>															
<b>Nº DIAS</b>															
		31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	
<b>RIO CHICAMA</b>															
Caudal m <sup>3</sup> /s		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	6.00	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )		1.34	1.21	1.34	1.30	1.34	1.30	1.34	1.34	1.30	1.34	1.30	1.34	15.77	
<b>RIO MOCHE</b>															
Caudal m <sup>3</sup> /s		0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	4.80	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )		1.07	0.97	1.07	1.04	1.07	1.04	1.07	1.07	1.04	1.07	1.04	1.07	12.61	
<b>RIO VIRU</b>															
Caudal m <sup>3</sup> /s		0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	1.80	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )		0.40	0.36	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	0.40	0.39	0.40	0.39	0.40	4.73	
<b>RIO CHAO</b>															
Caudal m <sup>3</sup> /s		0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.60	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )		0.13	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	1.58	
<b>Total Caudal Ecologicos</b>		<b>2.95</b>	<b>2.66</b>	<b>2.95</b>	<b>2.85</b>	<b>2.95</b>	<b>2.85</b>	<b>2.95</b>	<b>2.95</b>	<b>2.85</b>	<b>2.95</b>	<b>2.85</b>	<b>2.95</b>	<b>34.7</b>	

### 3.4.4 Parámetros de Comparación

#### Criterios de Desempeño del Sistema

Se calculó la confiabilidad para todas las extracciones para atender las demandas, además, para los usuarios que presentaron déficit en su extracción se calculó los parámetros de resiliencia y vulnerabilidad (McKinney et al. 2008).

- Confiabilidad: Valor estadístico, expresado como porcentaje, definido como el número de veces que una demanda fue abastecida en su totalidad en relación al número de periodos de simulación calculados.

$$\text{Confiabilidad} = \frac{\text{Numeros de periodos que no presento deficit}}{n}$$

Donde  $n$  es el número total de periodos en meses.

- Resiliencia: Definido como la probabilidad de que una vez que el sistema está en un periodo de déficit, el siguiente periodo no se presente déficit. Es un valor estadístico útil para evaluar la recuperación del sistema una vez que ha fallado.

$$\text{Resiliencia} = \frac{\text{Numero de veces que un periodo sin deficit es precedido por un periodo con deficit}}{\text{Numero de periodos con deficit}}$$

- Vulnerabilidad: Medida probabilística que evalúa la magnitud de los déficits del sistema, mediante un promedio. En este proyecto, la vulnerabilidad será presentada como en porcentaje del volumen de concesión.

$$\text{Vulnerabilidad} = \frac{\text{Sumatoria de los volúmenes de deficit}}{\text{Numero de periodos con deficit}}$$

#### Presas

En las presas Cascajal y Palo Redondo se realizó el cálculo y comparación de:

- Almacenamiento mensual promedio.
- Almacenamiento mínimo y máximo.

### **3.4.5 Simulación de los sistemas de recursos hídricos**

En el presente capítulo se presenta la simulación de los Sistemas de los cuatro valles que comprenden el Proyecto Chavimochic y los tres valles del Proyecto Chincas, realizada con el Modelo WEAP, el análisis comprende desde el límite norte que comprenden las Pampas de Urricape en Chicama hasta los arenales del valle de Casma en el sur.

El análisis del comportamiento de las cuencas será realizado en base a los datos recopilados, como son los caudales de los siete ríos que alimentan el sistema, las demandas de riego y las demandas de agua potable para las ciudades de Trujillo, Virú y Chao.

El programa WEAP tiene capacidad de desarrollar una simulación realista minuciosa en la medida en que se le provee con información confiable sobre los parámetros de interés.

Los parámetros con los que se ha contado para este modelo son los que a continuación se enumeran:

- **Demanda poblacional:** Considerando el Plan Director para la Región La Libertad elaborado por SEDALIB se tiene que para el año 2026 la demanda de agua potable será de 4.20 m<sup>3</sup>/s de los cuales 1.50 m<sup>3</sup>/s serán atendidos con aguas subterráneas debiendo el PECH suministrar 2.70 m<sup>3</sup>/s, es decir 1.70 m<sup>3</sup>/s adicionales a los entregados actualmente.
- **Demanda agrícola:** para áreas de mejoramiento en los valles viejos y áreas nuevas en los intervalles definida en el subcapítulo anterior del Proyecto Chavimochic y Chincas.
- **Caudales promedio mensuales históricos y sintéticos** de los ríos Casma, Sechin, Nepeña, Santa, Chao, Virú, Moche, Chicama, para definir la oferta de agua, tomados de registros proporcionados por Chavimochic y Chincas.
- **Evaporación promedio del embalse Palo Redondo** en Chavimochic y Cascajal en Chincas, los cuales se tomaron como puntos de salida del sistema.
- **De la simulación numérica del flujo de aguas subterráneas del acuífero de Chao** una vez ya calibrada y validada se analizaron escenarios de explotación, las cuales mantendrán el equilibrio de entre la recarga y explotación del acuífero. Los

resultados como la capacidad de almacenamiento del acuífero, las condiciones de recarga y descarga las que fueron ingresados al modelo de gestión Weap.

- Presa Palo redondo: ubicada en la Quebrada Palo redondo, margen derecha del río Santa, estratégicamente la ubicación del embalse en un sector bajo y aislado de la cuenca, minimiza la vulnerabilidad frente a eventos extraordinarios (fenómenos El Niño). Según los estudios definitivos la Presa tendrá una altura de 96 m, un volumen útil de 365 Hm<sup>3</sup>, un volumen muerto de 35 Hm<sup>3</sup>, haciendo una capacidad total de 400 Hm<sup>3</sup>, el tipo de Presa será de materiales gruesos con pantalla de concreto.
- Presa Cascajal: ubicada en la quebrada Cascajal margen izquierda del río Santa, la ubicación del embalse en un sector bajo y aislado de la cuenca mayor, minimiza la vulnerabilidad frente a eventos extraordinarios (fenómenos El Niño). Según los estudios de Factibilidad la Presa tendrá una altura de 50 m y el embalse tendrá un volumen útil de 90 Hm<sup>3</sup>, un volumen muerto de 30 Hm<sup>3</sup>, haciendo una capacidad total de 120 Hm<sup>3</sup>.
- Obras de captación (Bocatomas) en los ríos de Casma, Nepeña, Chao, Virú, Moche, Chicama, asegurando los caudales ecológicos considerados.
- Canales de conducción en Chincas: desde la bocatoma Tablones ubicada en el río Santa hasta los Valles de Casma.
- Canales de conducción en Chavimochic: desde la bocatoma Chavimochic ubicada en el río Santa hasta los Valles de Chicama – Pampas de Urricape.

Los escenarios de simulación en el modelo de gestión fueron:

- Escenario 1: Simulación del escenario actual
- Escenario 2: Simulación del escenario futuro con el mejoramiento e incremento de las áreas agrícolas, demanda poblacional en los Proyectos Chavimochic y Chinecas respetando las prioridades y caudales ecológicos, comprende desde el año 2016 al 2065.
- Escenario 3: Simulación del escenario futuro con incremento de explotación de aguas subterráneas, las cuales repercutirá con el mejoramiento e incremento de las áreas agrícolas, demanda poblacional en los Proyectos Chavimochic y Chinecas respetando las prioridades y caudales ecológicos, comprende desde el año 2016 al 2065
- Análisis de implementación de infraestructura de regulación.
- Escenario 4: Proyección de los embalses Palo Redondo y Cascajal para el escenario futuro con el mejoramiento e incremento de las áreas agrícolas, demanda poblacional en los Proyectos Chavimochic y Chinecas respetando las prioridades y caudales ecológicos, comprende desde el año 2016 al 2065.
- Escenario 5: Simulación del escenario futuro con incremento de aguas subterráneas y proyección de los embalses Palo Redondo y Cascajal para el escenario futuro con el mejoramiento e incremento de las áreas agrícolas, demanda poblacional en los Proyectos Chavimochic y Chinecas respetando las prioridades y caudales ecológicos, comprende desde el año 2016 al 2065.

### a. Calibración del escenario actual

En la etapa de calibración del modelo se busca lograr una representación de caudales y de operación de obras de infraestructura que asemeje los datos históricos de la forma más cercana posible.

Para esto, es necesario realizar comparaciones entre series de datos de caudales en puntos específicos de la cuenca observadas versus simuladas.

Los puntos donde se desea conocer exactamente el valor del caudal en un momento determinado durante el uso del modelo son los puntos donde se encuentran las estaciones de control (aforo), tanto en Chavimochic como en Chinecas.

El periodo de calibración es desde 2011 al 2015 a paso de tiempo mensual.

La precisión del modelo fue medida con los parámetros de error medio cuadrático (RMSE), el bias y la eficiencia de Nash-Sutcliffe:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (3.1)$$

y mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta,  $E=1$ ; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces  $E=0$ .

$$Bias = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o] \quad (3.2)$$

entre menor el porcentaje de Bias, mejor la correspondencia entre los datos observados y simulados. Un Bias positivo indica sobre estimación y un Bias negativo indica subestimación de caudales.

$$RMSE = \frac{100}{\bar{Q}_o} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{n}} \quad (3.3)$$

El rango de valores que puede tomar va desde cero hasta el infinito (positivo). El cero corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste.

**Cuadro 13:** Estación de control salida de Desarenador mira Linnimetrica Km 3+312,  
canal Irchim

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2011	20.63	20.48	20.47	19.85	17.60	20.46	18.76	15.33	15.16	16.06	16.04	20.23
2012	19.22	19.40	18.50	17.12	16.08	18.54	17.15	15.96	16.14	18.50	16.70	19.54
2013	19.99	20.18	18.17	15.97	16.77	18.47	16.34	17.98	17.87	19.87	16.95	20.80
2014	20.75	20.51	20.09	19.79	17.58	19.14	18.75	16.50	17.22	18.65	16.74	20.66
2015	21.04	21.07	20.45	20.41	16.97	18.45	18.79	18.89	19.11	19.37	17.56	20.82

**Cuadro 14:** Estación de control hidrométrico 40+100, canal Carlos Leight

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2011	5.39	5.23	5.53	4.85	4.67	5.37	4.50	5.01	5.80	3.28	4.25	5.53
2012	5.71	5.27	5.57	5.27	4.70	5.30	5.25	5.07	5.16	5.15	4.65	5.50
2013	5.66	5.43	4.26	4.23	4.47	4.75	4.30	4.56	4.96	5.40	4.51	5.28
2014	5.19	5.21	4.36	5.09	4.39	4.74	4.57	4.03	4.25	4.91	4.36	5.22
2015	5.28	5.26	5.22	5.40	4.64	5.34	5.36	5.19	5.31	5.36	4.53	5.41

**Cuadro 15:** Estación de control hidrométrico salida de embalse de compensación horaria  
Palito Redondo, canal Madre

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2012	17.35	18.36	18.69	18.36	18.75	20.55	17.76	18.40	17.31	20.72	21.03	21.51
2013	16.78	17.36	18.50	15.24	17.16	18.19	15.45	15.86	16.34	19.40	18.90	19.67
2014	16.25	17.36	17.79	17.18	17.89	20.25	17.29	17.96	16.85	20.49	20.67	21.24
2015	17.46	18.88	18.25	16.80	18.37	19.88	16.68	17.69	18.40	20.65	19.43	19.22

**Cuadro 16:** Escenarios de simulación de los recursos hídricos

Escenario	Proyecto	Valles Intervenidos	Año de simulación	Volumen Total de Demandas (Hm3)	Volumen ecológico (Hm3)	Ofertas					Demanda no cubierta Condición Hidrológica (Hm3)	Gestión Acción 1 Condición Hidrológica		Gestión Acción 2 Condición Hidrológica	
						Aporte Superficial	Volumen explotación subterránea			Embalse		Secuencia 1 (Hm3)	Secuencia 3 (Hm3)	Secuencia 1 (Hm3)	Secuencia 3 (Hm3)
							Actual (Hm3)	Futura (Hm3)	Gestión Futura						
1 Situación Actual	Chavimochic	Chao, Virú, Moche	2011 - 2015	1101.39	18.93	Histórico	40.94	---	---	Palito Redondo	Si	---	---	---	---
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña	2011 - 2015	748.99	162.4	Histórico	19.52	---	---	---	---	---	---	---	---
2 Factibilidad	Chavimochic	Chao, Virú, Moche, Chicama	2016 - 2065	2542.99	34.7	Sintético	---	275.3	---	---	Si	---	---	---	---
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña, Casma - Sechin	2016 - 2065	1185.28	171.88	Sintético	---	271.9	---	---	---	---	---	---	---
3	Chavimochic	Chao, Virú, Moche, Chicama	2016 - 2065	2542.99	34.7	Sintético	---	410.3	---	---	Si	---	---	---	---
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña, Casma - Sechin	2016 - 2065	1185.28	171.88	Sintético	---	271.9	---	---	---	---	---	---	---
4	Chavimochic	Chao, Virú, Moche, Chicama	2016 - 2065	2542.99	34.7	Sintético	---	275.3	451.74	Palo Redondo	Si	Si	Si	Si	Si
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña, Casma - Sechin	2016 - 2065	1185.28	171.88	Sintético	---	271.9	271.9	Casajal	---	---	---	---	---
5	Chavimochic	Chao, Virú, Moche, Chicama	2016 - 2065	2542.99	34.7	Sintético	---	451.74	---	Palo Redondo	Si	Si	Si	---	---
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña, Casma - Sechin	2016 - 2065	1185.28	171.88	Sintético	---	271.9	---	Casajal	---	---	---	---	---

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **4.1 ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA**

Los materiales necesarios a utilizar en el presente trabajo de investigación se detallan a continuación:

#### **4.1.1 Análisis exploratorio de datos**

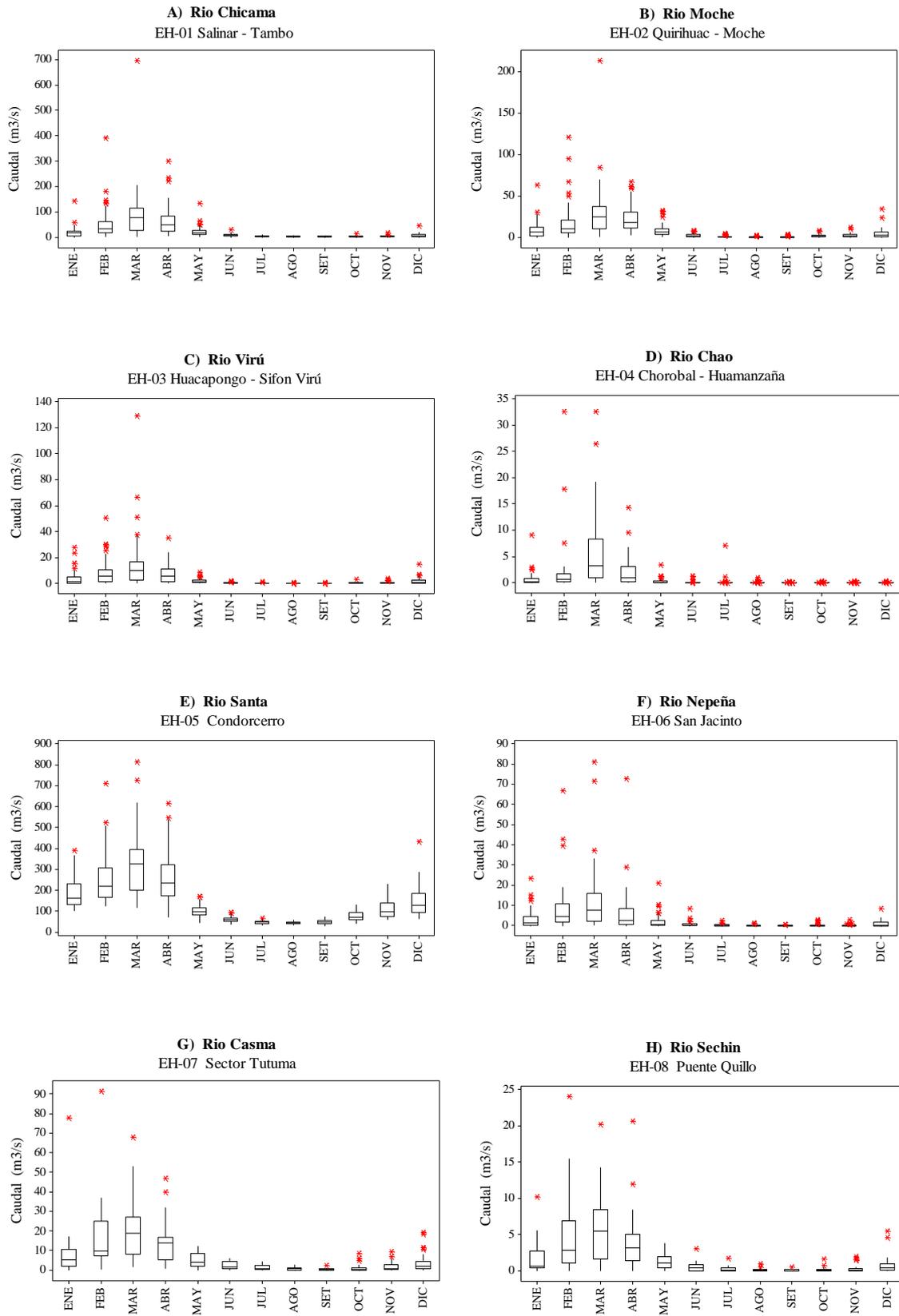
En esta etapa se ha realizado los gráficos de Boxplots, para detectar los datos atípicos (outliers) de manera cualitativa.

La gráfica Boxplot, de la Figura 8 muestra la presencia de valores atípicos, estos valores son más recurrentes durante los eventos de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) del año 1969-1970, 1982-1983, 1993-1994, 1997-1998 y 2007-2008, estos datos clasificados como atípicos durante estos años cobran significancia al examinar la totalidad de las estaciones, ya que estas presentan una tendencia similar entre ellas.

El tamaño de las cajas nos indica una alta variabilidad del comportamiento hídrico que poseen estas cuencas, las estaciones hidrométricas EH-04 (Chorobal-Huamanzaña), ubicada en la cuenca del río Chao, EH-05 (Condorcerro), ubicada en la cuenca del río Santa, EH-06 (San Jacinto), ubicada en la cuenca del río Nepeña, EH-07 (Sector Tutuma), ubicada en la cuenca del río Casma, EH-08 (Puente Quillo), ubicada en la cuenca del río Sechin.

Solo la EH-05 (Condorcerro), ubicado en la cuenca del río Santa, presenta el caudal promedio anual multianual de 140.4 m<sup>3</sup>/s superior al de las estaciones vecinas, este caudal es explicado por la presencia de glaciares en la Cordillera Blanca, la fusión del hielo aporta el recurso hídrico a la cuenca del Santa.

Se observa un comportamiento similar en los ríos Chao, Virú, Moche, Chicama, Nepeña, Casma y Sechin en época de avenidas entre diciembre y mayo, mientras que el resto del año una época de estiaje de niveles extremadamente mínimo, confirmando de esta manera su irregularidad.



**Figura 8:** Diagrama de cajas de caudales mensuales de las estaciones hidrométricas.

#### **4.1.2 Homogenización de Estaciones Método del Vector Regional**

La agrupación de estaciones con un comportamiento hídrico similar se obtuvo aplicando el Método del Vector Regional, la salida del programa contiene varios parámetros que evalúan la calidad de los resultados. Se consideran principalmente los siguientes parámetros:

- El coeficiente de correlación “r” del índice con las estaciones ( $> 0.70$ )
- El valor de las desviaciones (que se deben mantener dentro de un margen de tolerancia)
- Los límites de confianza (inferior y superior) dentro de los que se deben mantener las series interanuales del índice del vector

Región 01:

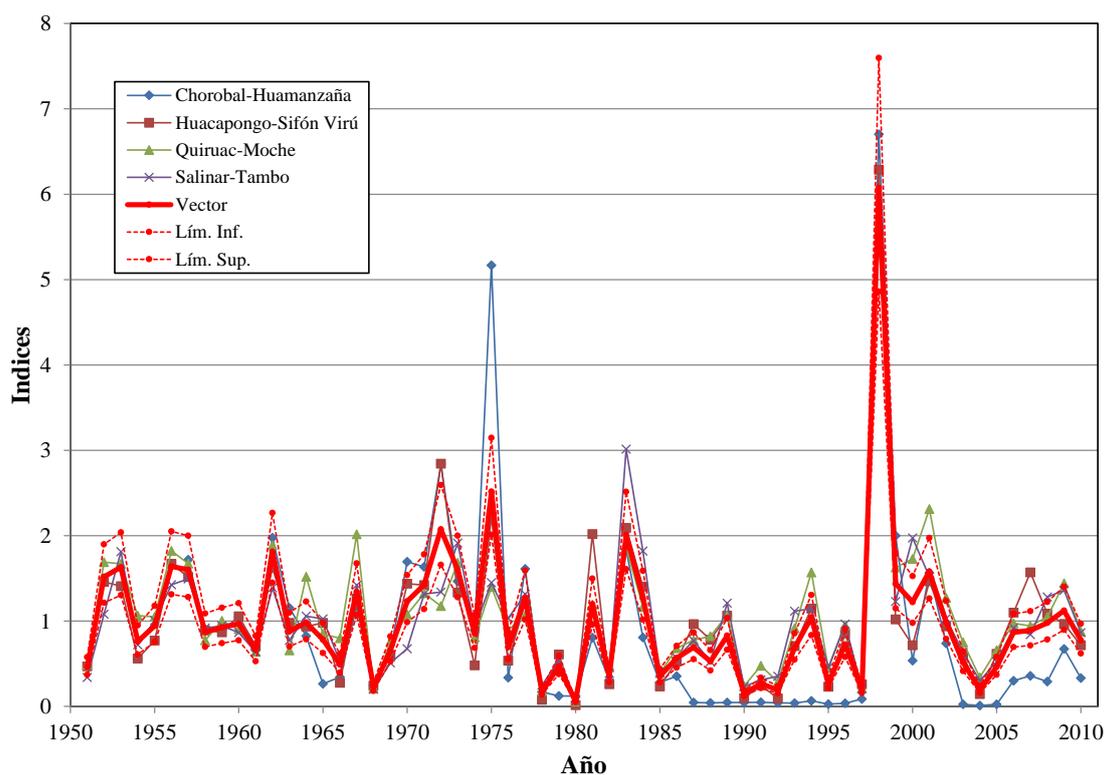
Conformada por las estaciones hidrométricas Salinar - Tambo, Quirihuac - Moche, Huacapongo - Sifón Virú, Chorobal – Huamanzaña, los índices obtenidos sobre los valores anuales de periodos históricos comunes tienen un alto coeficiente de correlación (mayores a 0.92) y una baja desviación (menores a 0.53), esto nos indica que las estaciones están dentro del intervalo de confianza, por lo que da una idea de calidad y homogeneidad para trabajar con los datos de caudales. Un índice superior a 1 indica un año húmedo en que el caudal o escurrimiento del grupo de estaciones ha sido superior al promedio interanual. Un valor inferior a 1 indica un año deficitario. En la región 01 se observa una gran variación interanual, con años como el de 1997 – 1998 en que el vector regional supero el valor de 6, y años que estuvo debajo de 0.2.

Región 02:

Conformada por las estaciones hidrométricas Condorcerro, San Jacinto, Sector Tutuma, Puente Quillo, los índices obtenidos sobre los valores anuales de periodos históricos comunes tienen un alto coeficiente de correlación (mayores a 0.78) y una baja desviación (menores a 0.44), esto nos indica que las estaciones están dentro del intervalo de confianza, por lo que da una idea de calidad y homogeneidad para trabajar con los datos de caudales.

En la región 02 se observa una gran variación interanual, con años como el de 1983 – 1984 y 1997 – 1998 en que el vector regional supero el valor de 3 y 2 respectivamente, y años que estuvo debajo de 0.4.

**Indices anuales del Vector 01 y de las Estaciones**



**Figura 9:** Índices anuales del Vector 01.

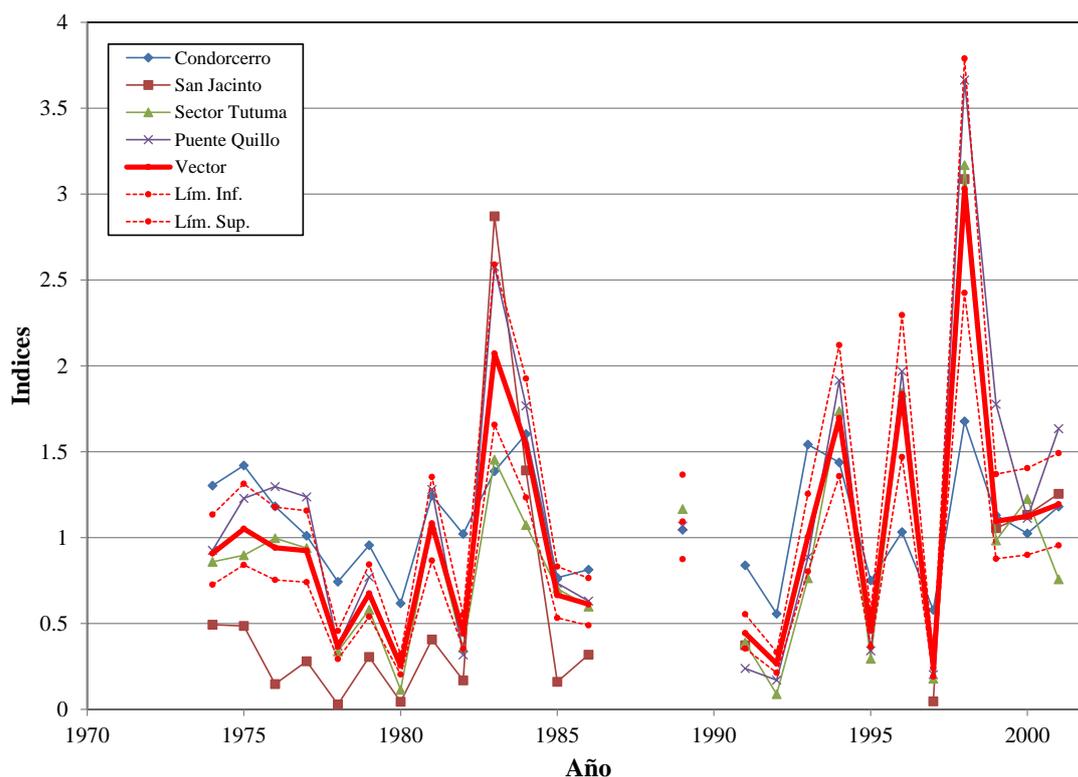
**Cuadro 17:** Región 01, caudales anuales MVR

Codigo	Estación	Media Obs.	Media Calculada	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. /Vector
EH-01	Salinar - Tambo	23.700	23.000	0.303	0.033	0.935
EH-02	Quirihuae - Moche	8.800	8.100	0.300	0.011	0.940
EH-03	Huacapongo - Sifón Virú	3.400	3.300	0.235	0.616	0.965
EH-04	Chorobal - Huamazaña	0.800	1.000	0.538	0.008	0.920

**Cuadro 18:** Región 02, caudales anuales MVR

Codigo	Estación	Media Obs.	Media Calculada	D.E. Desvíos	Homogeneidad B.M.	Correl. /Vector
EH-05	Condorcerro	142.9	133.1	0.442	0.283	0.788
EH-06	San Jacinto	4.4	6	0.424	0.109	0.935
EH-07	Sector Tutuma	6.7	7.4	0.203	0.471	0.962
EH-08	Puente Quillo	1.8	1.6	0.277	0.086	0.978

**Índices anuales del Vector 02 y de las Estaciones**



**Figura 10:** Índices anuales del Vector 02.

### 4.1.3 Análisis Estadístico de Saltos y tendencias

El análisis estadístico se basó en la aplicación de las pruebas estadísticas de consistencia u homogeneidad del valor medio y de la variancia.

El análisis de consistencia practicado a la serie de caudales medios mensuales registrados en la estación en estudio, comprenden las pruebas T de Student y F de Fisher, para probar la existencia de consistencia en la media y la desviación estándar respectivamente.

La secuencia siguiente es la de verificación y corrección de saltos y/o tendencias de las series de datos, para posteriormente efectuar la completación de la información faltante.

El Cuadro 19 muestra consistencia en el valor medio para todas las estaciones, exceptuando la Estación Quirihuac – Moche (EH-02) e inconsistente en la desviación estándar para todas las estaciones. La estación Quirihuac – Moche (EH-02) es inconsistente tanto en la media (ligeramente) como en la desviación estándar, los valores calculados de T calculado y T tabulado muestran que la inconsistencia en los datos es ligeramente pequeña por lo tanto los datos de las estaciones no serán corregidos.

La prueba de análisis de tendencia en la media muestra que los datos son consistentes para todas las estaciones.

**Cuadro 19:** Análisis estadístico de consistencia Región 01

Estacion			Chorobal-Huamanzaña	Huacapongo-Sifon Viru	Quirihuac-Moche	Salinar-Tambo		
Análisis de saltos en la media y la desviación estándar								
a) Cálculo de los Parámetros Estándar	Tramo	Periodo	Tramo 1	1956-1997	1950-1997	1950-1997	1950-1997	
			Tramo 2	1998-2010	1998-2010	1998-2010	1998-2010	
	Media	X	Tramo 1	0.81	3.10	7.78	21.14	
			Tramo 2	1.02	4.38	11.96	32.06	
	Desv. Estad	S	Tramo 1	0.97	2.01	4.08	13.00	
			Tramo 2	1.76	4.80	10.33	31.39	
	Varianza	S <sup>2</sup>	Tramo 1	0.95	4.05	16.61	168.89	
			Tramo 2	3.11	23.07	106.68	985.36	
Tamaño	n	Tramo 1	42.00	48.00	48.00	48.00		
		Tramo 2	13.00	13.00	13.00	13.00		
b) Prueba de las Medias	Des. Est. Ponderada		Sd	0.38	0.88	1.85	5.72	
	Des. Est. Promedios		Sp	1.20	2.81	5.91	18.30	
	T calculado		Tc	0.54	1.46	2.26	1.91	
	GLibertad		GL	53.00	59.00	59.00	59.00	
	Probab. 95% - Signif. 5%		$\alpha/2$	0.025	0.025	0.025	0.025	
	T tabulado		Tt	1.96	1.96	1.96	1.96	
	Prueba Estadística			No Corregir	No Corregir	Corregir	No Corregir	
c) Prueba de la Desviación Estándar	F calculado		Fc	3.28	5.70	6.42	5.83	
	GLN = n-1		Numerador	12.00	12.00	12.00	12.00	
	GLD = n-1		Denominador	41.00	47.00	47.00	47.00	
	Probab. 95% - Signif. 5%		$\alpha/2$	0.025	0.025	0.025	0.025	
	F tabulado			2.00	1.98	1.98	1.98	
	Prueba Estadística			Corregir	Corregir	Corregir	Corregir	
Análisis de tendencia en la media								
d) Prueba de análisis de Tendencia en la Media	Caudales	Promedio	Tm	0.86	3.37	8.67	23.47	
		(Tm)	Desv. Est.	STm	1.19	2.84	6.11	18.70
	Tiempo	Promedio	t	28.00	31.00	31.00	31.00	
		(t)	Desv. Est.	St	16.02	17.75	17.75	17.75
	Tm.t	Promedio	Tm.t	20.28	104.60	271.21	750.64	
		Coef. Corr.	R	-0.202	0.002	0.024	0.070	
	Prueba del Coeficiente de Correlación Lineal	N° de datos		n	55	61	61	61
		T calculado		Tc	-1.502	0.019	0.181	0.538
		GLibertad		GL	53.000	59.000	59.000	59.000
		Signif. 5%		$\alpha/2$	0.025	0.025	0.025	0.025
T tabulado		Tt	1.96	1.96	1.96	1.96		
Resultado			No Corregir	No Corregir	No Corregir	No Corregir		

En el Cuadro 20 muestra consistencia en el valor medio para todas las estaciones, exceptuando la Estación San Jacinto (EH-06) e inconsistente en la desviación estándar para todas las estaciones exceptuando la Estación Condorcerro (EH-05). La estación San Jacinto (EH-06) es inconsistente tanto en la media (ligeramente) como en la desviación estándar, los valores calculados de T calculado y T tabulado muestran que la inconsistencia en los datos es ligeramente pequeña por lo tanto los datos de las estaciones no serán corregidos.

La prueba de análisis de tendencia en la media muestra que los datos son consistentes para todas las estaciones.

**Cuadro 20:** Análisis estadístico de consistencia Región 02

Estacion			Condorcerro	San Jacinto	Sector Tutuma	Puente Quillo		
Análisis de saltos en la media y la desviación estandar								
a) Cálculo de los Parámetros Estandar	Tramo	Periodo	Tramo 1 Tramo 2	1956-1997 1998-2010	1960-1982 1983-2001	1960-1982 1983-2001	1960-1982 1983-2001	
	Media	$\bar{X}$	Tramo 1 Tramo 2	139.27 144.57	1.96 4.84	5.17 6.69	1.26 1.79	
	Desv. Estad	S	Tramo 1 Tramo 2	35.32 34.81	1.25 5.29	1.85 5.22	0.60 1.45	
	Varianza	$S^2$	Tramo 1 Tramo 2	1247.38 1211.93	1.55 27.96	3.43 27.26	0.36 2.11	
	Tamaño	n	Tramo 1 Tramo 2	42.00 13.00	23.00 19.00	10.00 19.00	10.00 19.00	
	b) Prueba de las Medias	Des. Est. Ponderada		Sd	11.17	1.14	1.72	0.48
Des. Est. Promedios		Sp	35.20	3.67	4.40	1.23		
T calculado		Tc	0.47	2.53	0.88	1.09		
GLibertad		GL	53.00	40.00	27.00	27.00		
Probab. 95% - Signif. 5%		$\alpha/2$	0.025	0.025	0.025	0.025		
T tabulado		Tt	1.96	1.96	2.07	2.05		
Prueba Estadística			No Corregir	Corregir	No Corregir	No Corregir		
c) Prueba de la Desviación Estandar	F calculado		Fc	1.03	18.02	7.94	5.87	
	GLN = n-1		Numerador	41.00	18.00	18.00	18.00	
	GLD = n-1		Denominador	12.00	22.00	9.00	9.00	
	Probab. 95% - Signif. 5%		$\alpha/2$	0.025	0.025	0.025	0.025	
	F tabulado			2.43	2.19	3.03	2.98	
	Prueba Estadística			No Corregir	Corregir	Corregir	Corregir	
Análisis de tendencia en la media								
d) Prueba de análisis de Tendencia en la Media	Caudales (Tm)	Promedio	$\bar{T}_m$	140.52	3.26	6.17	1.61	
		Desv. Est.	$S\bar{T}_m$	34.95	3.90	4.38	1.24	
	Tiempo (t)	Promedio	$\bar{t}$	28.00	21.05	15.00	15.00	
		Desv. Est.	$S_t$	16.02	11.84	8.51	8.51	
	$\bar{T}(m.t)$		Promedio	$\bar{T}(m.t)$	3906.43	83.53	101.67	26.78
	Prueba del Coeficiente de Correlación Lineal	Coef. Corr.		R	-0.050	0.321	0.246	0.254
		N° de datos		n	55	42	29	29
		T calculado		Tc	-0.366	2.143	1.320	1.362
		GLibertad		GL	53.000	40.000	27.000	27.000
		Signif. 5%		$\alpha/2$	0.025	0.025	0.025	0.025
T tabulado		Tt	1.96	2.143	2.045	2.045		
Resultado			No Corregir	No Corregir	No Corregir	No Corregir		

#### 4.1.4 Completación de datos hidrometeorológicos

La estimación de los datos faltantes se obtuvo mediante una regresión lineal simple, el cual es un método comúnmente usado por su simplicidad al estimar un dato ausente para el periodo de un año.

La Cuadro 21 nos muestra el resultado de los datos mensuales faltantes por estación, solo habrá completación entre estaciones si estas pertenecen a una misma región, esto de acuerdo al análisis regionalización por el método del vector regional.

**Cuadro 21:** Estaciones con dato mensual faltante

Código	Estación	Rio	Metodo de Completación Regresion Lineal simple
EH - 01	Salinar - Tambo	Chicama	0
EH - 02	Quirihuac - Moche	Moche	2
EH - 03	Huacapongo - Sifón Viru	Virú	6
EH - 04	Chorobal - Huamanzaña	Chao	0
EH - 05	Condorcerro	Santa	0
EH - 06	San Jacinto	Nepeña	20
EH - 07	Sector Tutuma	Casma	7
EH - 08	Puente Quillo	Sechin	8

## 4.2 MODELO DE SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA

Se realizara una simulación estocástica a nivel anual de la Estación Condorcerro para la determinación de la dimensión de dos embalses y simulación estocástica a nivel mensual de las estaciones Salinar - Tambo, Quirihuac – Moche, Huacapongo – Sifón Virú, Chorobal - Huamanzaña, Condorcerro, San Jacinto, Sector Tutuma, Puente Quillo, para la construcción de reglas de gestión para la operación de un sistema de embalses, estrategias de gestión para la adecuada distribución del recurso hídrico para los diferentes usos, realización de balances hídricos (oferta vs demanda).

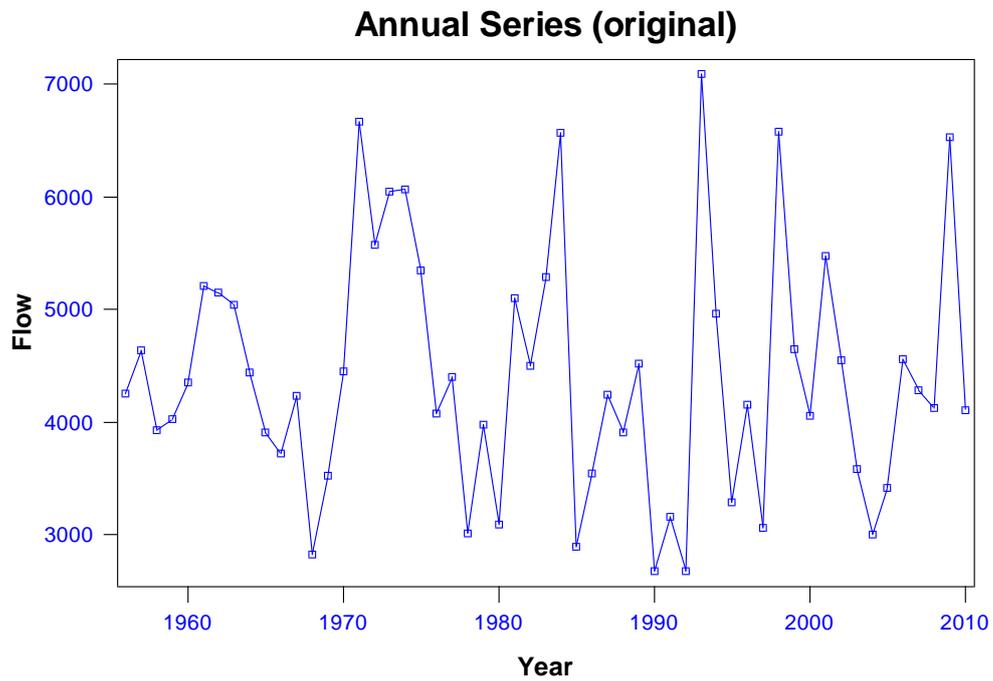
### 4.2.1 Análisis de datos

Las series de caudales fueron analizadas previamente de la cual se puede observar gráficamente el comportamiento de la serie de tiempo, estadísticos básicos de la serie de tiempo, las transformaciones a los datos originales (Log, Gama, Power, Box Cox).

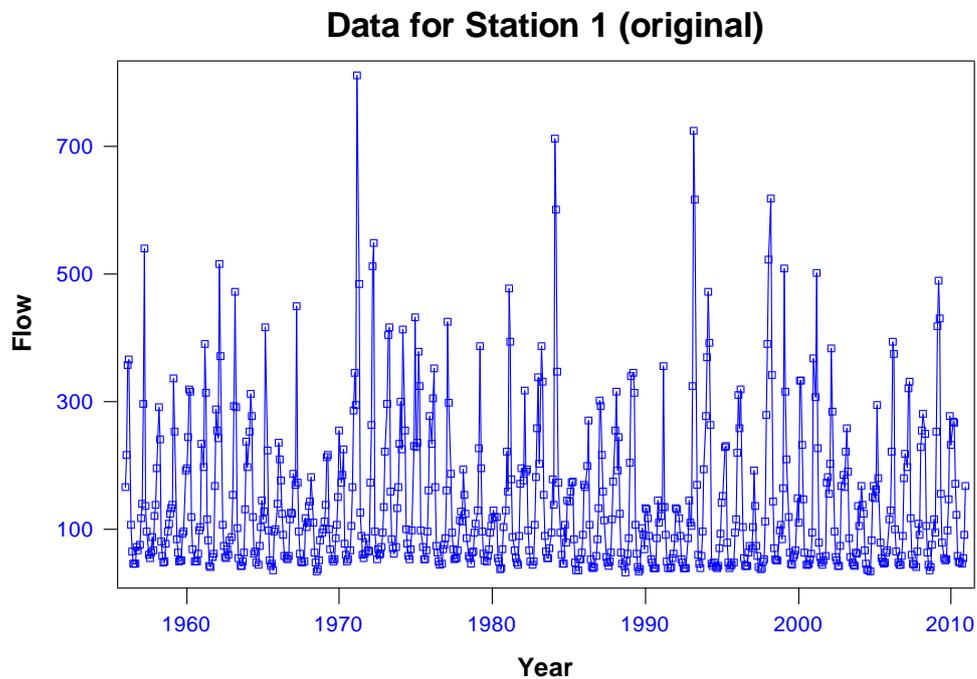
En la Figura 11 se muestra las aportaciones anuales históricas de la Estación Condorcerro expresadas en  $\text{Hm}^3$ , Se observaron aportaciones anuales superiores a los  $6000 \text{Hm}^3$  en los años 1971, 1983, 1994, 1997 y 2008 esto responde a la presencia de fenómeno “El Niño”.

La descarga máxima se presentó en el año 1984 con  $711 \text{m}^3/\text{s}$ , mientras la mínima descarga fue en setiembre de 1988 con  $31.38 \text{m}^3/\text{s}$ . El rio Santa en los últimos 55 años, supera al promedio multianual de  $140.52 \text{m}^3/\text{s}$  en 25 años, mientras los años restantes son inferiores al promedio multianual.

## Estación Condorcerro



**Figura 11:** Aportaciones anuales históricas de la estación Condorcerro  $\text{Hm}^3$ .



**Figura 12:** Aportaciones mensuales históricas de la estación Condorcerro  $\text{m}^3/\text{s}$ .

## b. Normalización

Para las series anuales y mensuales históricas se comprobó la normalidad, mediante la prueba de normalidad de Sesgo y la prueba de normalidad de Filliben.

La prueba de normalidad de sesgo es basada sobre el hecho de que el coeficiente de sesgo es cero para una variable normal y la prueba de normalidad de Filliben es la correlación que existe entre los cuantiles muestrales y los cuantiles que se esperaría de una distribución normal.

Al no cumplir las pruebas de normalidad las series anuales y mensuales, se realizó la transformación a logarítmica y gama, primero, realizando primero a los escurrimientos anuales y después se realizó la transformación para cada mes. El Cuadro 22 muestra las transformaciones que se realizaron anual y mensualmente tanto Logarítmicas como Gamma, las pruebas de normalidad de Sesgo y Filliben a las que fueron sometidas son aceptables.

**Cuadro 22:** Resumen de la normalización de las series anuales y mensuales de la estación Condorcero con la función logarítmica y gama

Meses	Transf.	Coef. a	Coef. b	Prueba normalidad de sesgo		Prueba normalidad de Filliben	
Anual	Log	0	1	0.0414	accept	0.9919	accept
Enero	Log	-79.4331	1	-0.0851	accept	0.9904	accept
Febrero	Log	-101.822	1	-0.2007	accept	0.99	accept
Marzo	Gamma	0	1	0.0665	accept	0.9914	accept
Abril	Log	58.976	1	-0.0265	accept	0.9967	accept
Mayo	Log	72.6528	1	0.0052	accept	0.9914	accept
Junio	Gamma	0	1	0.0645	accept	0.9927	accept
Julio	Log	0	1	0.1148	accept	0.9953	accept
Agosto	Log	0	1	0.0188	accept	0.9938	accept
Setiembre	Log	0	1	0.0761	accept	0.9957	accept
Octubre	Log	0	1	0.0414	accept	0.9901	accept
Noviembre	Log	0	1	0.2401	accept	0.9836	accept
Diciembre	Log	-44.8739	1	-0.0371	accept	0.994	accept

Las pruebas realizadas a las estaciones Salinar-Tambo mostraron que se debían realizar transformaciones logarítmica y gama, Quirihuac-Moche transformaciones logarítmica, Huacapongo -Sifón Virú transformaciones logarítmica y gama, Chorobal - Huamanzaña transformaciones logarítmica y gama, San Jacinto transformación logarítmica, Sector Tutuma transformación logarítmica y gama, Puente Quillo transformación logarítmica y gama, los resultados detallados se encuentran en el Anexo 1.

### c. Estadísticas básicas de las series

Una vez que ya se terminó de normalizar las series de las diferentes estaciones se procedió a calcular las estadísticas básicas para la serie anual solo para la Estación Condorcero y estadísticas básicas mensuales para las demás estaciones, así como también las estadísticas de las series transformadas como la media, desviación estándar, coeficiente de variación, el sesgo, valor mínimo, valor máximo, función de autocorrelación con retraso 1 y 2.

En la Cuadro 24 se puede distinguir que la serie media mensual (original y transformada) muestra que el mes de marzo tiene una magnitud considerable de aportación, también hay que ver que los meses de menores aportaciones son julio, agosto y setiembre.

**Cuadro 23:** Estadísticas básicas serie histórica anual y mensual estación Condorcero en Hm<sup>3</sup>

Mes	media	Desv. estandar	Coef. variacion	sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Anual	4409.0	1084.0	0.2459	0.572	2678	7088	0.1802	0.0262
Enero	511.9	199.4	0.3895	1.0032	277.5	1046	-0.0366	-0.0357
Febrero	618.8	283.6	0.4584	1.5608	306.4	1720	0.1	0.015
Marzo	893.0	395.1	0.4425	0.8883	312.3	2173	-0.0658	0.0384
Abril	669.8	305.0	0.4554	0.9184	189.8	1598	0.2044	0.0954
Mayo	271.1	77.9	0.2873	0.463	123.3	460.6	-0.0067	0.1248
Junio	160.3	33.0	0.206	0.8256	102.1	248.6	0.1989	0.1985
Julio	129.5	21.6	0.1669	0.5386	89	184.7	0.2471	0.2662
Agosto	121.1	16.9	0.1393	0.3175	90.48	164.2	0.4006	0.4576
Setiembre	130.1	26.9	0.2065	0.4924	81.34	197	0.4563	0.3646
Octubre	206.1	54.7	0.2651	0.4874	110.8	352.7	0.2701	0.1355
Noviembre	285.5	102.8	0.3602	0.8379	157.6	595.7	0.0991	-0.1826
Diciembre	411.3	199.1	0.4842	1.3423	173.6	1155	0.0434	-0.0167

**Cuadro 24:** Estadísticas básicas serie transformada anual y mensual estación Condorcero

Mes	media	Desv. estandar	Coef. variacion	sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Anual	8.362	0.2434	0.0291	0.0414	7.893	8.866	0.1901	0.0546
Enero	4.49	0.6903	0.1538	-0.0851	3.185	5.74	0.0143	0.0652
Febrero	4.755	0.7805	0.1641	-0.2007	3.212	6.412	0.1619	0.0546
Marzo	0.001103	0.9947	902.1916	0.0665	-1.859	2.485	-0.0999	0.1392
Abril	5.694	0.3647	0.064	-0.0265	4.884	6.516	0.1935	0.1617
Mayo	5.145	0.1662	0.0323	0.0052	4.776	5.5	-0.0181	0.1651
Junio	0.001699	0.9924	584.1218	0.0645	-2.416	2.182	0.1981	0.2221
Julio	3.864	0.1646	0.0426	0.1148	3.503	4.234	0.2045	0.2338
Agosto	3.802	0.1389	0.0365	0.0188	3.52	4.116	0.3729	0.4329
Setiembre	3.895	0.2043	0.0525	0.0761	3.446	4.331	0.4452	0.3989
Octubre	4.309	0.2638	0.0612	0.0414	3.722	4.881	0.2758	0.1274
Noviembre	4.641	0.3462	0.0746	0.2401	4.108	5.437	0.024	-0.1743
Diciembre	4.467	0.6756	0.1512	-0.0371	2.992	5.957	-0.0576	0.0425

#### d. Estadísticas de almacenamiento, sequía y superávit de las series

También se realizaron los cálculos estadísticos de almacenamiento, sequía y superávit tanto en duración como en magnitud.

En la Cuadro 25 se calculó los estadísticos donde se han considerado 13 niveles de demanda el cual sea igual al valor medio de la serie de tiempo de aportaciones, luego tomando como valor de demanda igual a 95%, 90%, 85%, 80%, 75%, 70%, 65%, 60%, 55%, 50%, 45%, 40% del valor medio de la serie de tiempo de aportaciones.

**Cuadro 25:** Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones anuales originales de la estación Condorcerro

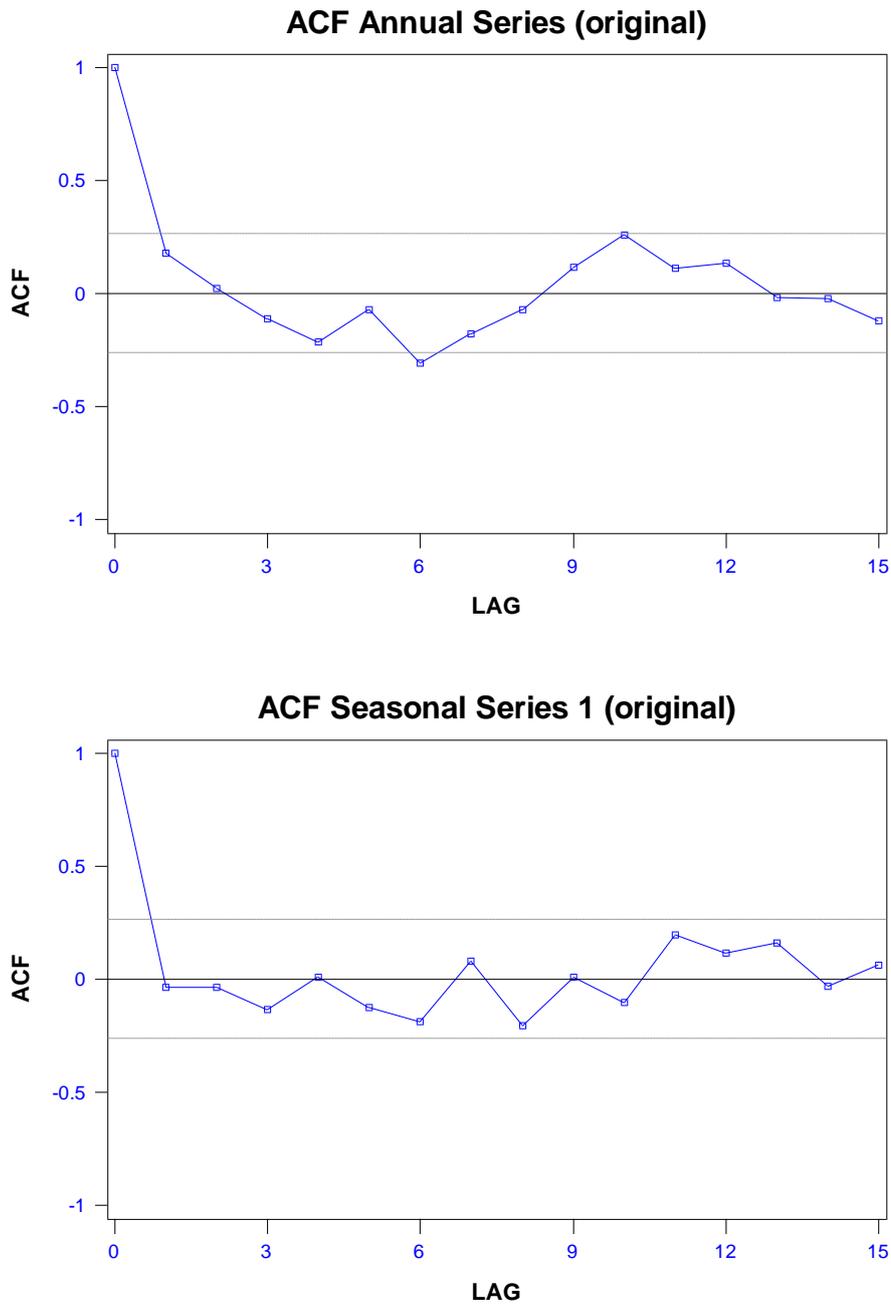
Nivel de Demanda	Maxima duracion deficit	Maxima Magnitud deficit	Maxima duracion superavit	Maxima Magnitud superavit	Capacidad de almacenamiento	Rango Reajustado	Coeficiente de Hurst
	Años	Hm3	Años	Hm3	Hm3		
1.00*mean	5	4707.082	6	7692.371	7639.685	7.3978	0.604
0.95*mean	3	4045.796	6	9014.943	5876.256	7.3978	0.604
0.90*mean	3	3384.510	8	10874.832	4112.826	7.3978	0.604
0.85*mean	3	2723.224	10	12638.262	2723.224	7.3978	0.604
0.80*mean	3	2061.938	12	14401.691	2061.938	7.3978	0.604
0.75*mean	3	1400.652	12	16382.841	1400.652	7.3978	0.604
0.70*mean	1	407.778	12	18366.699	739.366	7.3978	0.604
0.65*mean	1	187.349	21	36605.605	187.349	7.3978	0.604
0.60*mean	0	0	55	96988.622	0	7.3978	0.604
0.55*mean	0	0	55	109112.200	0	7.3978	0.604
0.50*mean	0	0	55	121235.778	0	7.3978	0.604
0.45*mean	0	0	55	133359.356	0	7.3978	0.604
0.40*mean	0	0	55	145482.934	0	7.3978	0.604

**Cuadro 26:** Estadísticas relacionadas de almacenamiento, sequía y superávit para la serie de aportaciones mensuales originales de la estación Condorcerro

Nivel de Demanda	Maxima duracion deficit	Maxima Magnitud deficit	Maxima duracion superavit	Maxima Magnitud superavit	Capacidad de almacenamiento	Rango Reajustado	Coeficiente de Hurst
	Meses	Hm3	Meses	Hm3	Hm3		
1.00*mean	19	3408.515	7	4049.522	8785.369	30.762	0.591
0.95*mean	19	2585.716	7	4159.737	6874.987	30.762	0.591
0.90*mean	18	2238.692	7	4276.947	4964.605	30.762	0.591
0.85*mean	10	1392.243	7	4405.530	3841.906	30.762	0.591
0.80*mean	9	1245.291	7	4534.114	3070.405	30.762	0.591
0.75*mean	8	1098.339	8	4666.840	2307.306	30.762	0.591
0.70*mean	8	951.386	8	4813.792	1554.175	30.762	0.591
0.65*mean	8	813.575	8	4960.745	1078.110	30.762	0.591
0.60*mean	7	684.992	9	5119.745	772.321	30.762	0.591
0.55*mean	7	556.409	9	5285.067	556.409	30.762	0.591
0.50*mean	7	427.825	10	5450.388	427.825	30.762	0.591
0.45*mean	6	316.060	10	5622.108	316.060	30.762	0.591

### e. Estandarización de la serie transformada

Se realizó la estandarización de las series anuales originales y de las series mensuales transformadas, mediante la sustracción de la media y la división de la desviación típica. Tenemos que tener en cuenta que una vez que se ha realizado el ajuste del modelo, se deberá deshacer las operaciones efectuadas a la serie original, mediante las operaciones inversas. La función de autocorrelación para la serie mensual transformada y tipificada se muestra a continuación.



**Figura 13:** Estandarización de la serie anual y mensual

## 4.2.2 Modelos para series de tiempo

Los modelos que se describirán a continuación son procesos lineales donde la dependencia temporal es el concepto clave para su análisis.

### a. Modelo autoregresivo de media móvil (ARMA)

Las órdenes del modelo  $p$  y  $q$  son respectivamente las órdenes de la parte autoregresiva y media móvil y representan los retrasos en cada modelo. Por lo tanto la denominación para estos modelos es ARMA ( $p,q$ ).

Un buen indicador de la orden del proceso ARMA, se lo realiza mediante las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial de la serie de tiempo. Según la literatura revisada (Cryer y Chan 2008) la función de autocorrelación se hace cero para intervalos más allá de  $q$  retrasos y la función de autocorrelación parcial se hace cero para intervalos más allá de  $p$  retrasos, por lo tanto para iniciar el ajuste del modelo se puede comenzar con las órdenes que nos indican estas funciones.

El ajuste del modelo no es más que la determinación de los parámetros del mismo, y como punto final de la modelación sería la comprobación de la bondad de ajuste. Hay que indicar que existirán muchos modelos ARMA que cumplirían las suposiciones iniciales, es decir, que el modelo es capaz de reproducir las propiedades estadísticas históricas de los datos y esencialmente las suposiciones claves de los residuos como la normalidad y la independencia. Por lo tanto cuando existan múltiples modelos que hayan pasado las pruebas de las suposiciones iniciales, se puede aplicar otro enfoque muy utilizado como el criterio de información de Akaike corregido (Hurvich y Tsai 1989), el mismo que es derivado del criterio de información de Akaike (Akaike 1974). Los dos se basan en una penalización de los modelos con mayor número de parámetros.

**Cuadro 27:** Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos ARMA – Estación Condorcerro

ANUAL	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
	AICC														
AICC	57.206	59.427	60.200	57.420	58.963	60.076	59.439	61.824	64.222	61.756	64.181	66.708	60.602	62.428	67.808
SIC	56.982	60.971	63.422	57.197	60.507	63.298	60.983	65.046	69.027	64.978	68.985	72.995	65.407	68.715	75.469

El modelo ARMA (1,0) es el que mejor se ajusta según el criterio de Akaike Corregido, y con el cual se trabajara para la generación de series sintéticas anuales.

## b. Modelo autoregresivo de media móvil periódico (PARMA)

Para las series hidrológicas estacionales, las estadísticas estacionales como la media y la desviación estándar pueden ser reproducidas por un modelo ARMA periódico (PARMA). El enfoque de este método es la dependencia temporal estación-estación, por ejemplo las correlaciones de las temporadas de invierno, verano, etc, por lo tanto la denominación para estos modelos es PARMA (p,q) (Salas et al. 1980).

Para escoger el mejor modelo según el criterio de información de Akaike corregido - AICC (Hurvich y Tsai 1989) se ha confeccionado una Cuadro con estos valores para los 12 modelos PARMA ajustados.

**Cuadro 28:** Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – estación Condorcero

MES	(1,0) AICC	(2,0) AICC	(3,0) AICC	(0,1) AICC	(0,2) AICC	(0,3) AICC	(1,1) AICC	(1,2) AICC	(1,3) AICC	(2,1) AICC	(2,2) AICC	(2,3) AICC	(3,1) AICC	(3,2) AICC	(3,3) AICC
1	45.731	47.743	49.347	55.386	46.804	50.749	47.582	49.125	51.923	49.638	51.295	54.444	51.772	54.040	51.769
2	44.499	46.237	48.215	46.186	50.432	48.301	46.344	48.438	50.724	48.267	50.872	52.973	49.425	50.886	52.775
3	41.643	43.020	44.354	48.811	45.542	50.053	42.618	44.493	44.970	43.732	44.730	46.256	46.226	48.950	45.789
4	13.874	16.096	18.120	23.552	22.469	17.921	16.068	18.433	19.474	18.340	20.212	21.981	16.631	20.196	19.162
5	20.945	22.165	19.650	39.162	37.667	20.616	22.021	20.344	21.914	22.817	24.551	23.589	21.215	23.322	23.206
6	13.298	13.585	15.427	30.807	32.866	21.456	13.248	15.247	19.159	15.711	17.356	16.996	17.768	19.973	16.571
7	22.035	24.270	23.117	37.811	32.917	40.048	23.909	19.786	24.031	24.020	21.339	24.564	22.400	24.609	23.574
8	-12.690	-10.489	-11.376	25.186	-11.213	-3.070	-10.450	-12.099	-8.431	-8.160	-9.880	-6.342	-9.173	-12.595	-9.893
9	32.999	33.681	34.414	33.474	49.212	32.115	33.681	35.046	35.353	34.413	35.529	36.410	35.637	38.977	40.330
10	51.141	52.345	54.303	56.370	53.365	59.528	52.710	52.739	53.956	54.223	52.609	55.557	52.743	56.776	60.023
11	42.693	44.614	44.921	45.968	43.306	44.805	44.919	44.336	46.675	43.379	46.876	48.112	47.144	48.871	51.460
12	20.476	21.603	18.173	22.804	29.024	19.657	21.758	19.101	22.399	23.866	23.331	23.443	20.436	22.214	23.461

En la Cuadro anterior están sombreados los modelos escogidos para cada uno de las series periódicas (mensuales), el modelo PARMA (1,0) se resalta para los meses de enero, febrero, marzo, abril, agosto, octubre y noviembre; el modelo PARMA (3,0) se resalta en los meses de mayo y diciembre; el modelo PARMA (0,3) se resalta en el mes setiembre, el modelo PARMA (1,1) se resalta en el mes junio y por último el modelo PARMA (1,2) se resalta en el mes de julio.

En esta investigación se decidió trabajar con un solo modelo y es donde se encuentren la mayor parte de meses resaltados según el criterio de Akaike Corregido, este es el PARMA (1,0).

### 4.2.3 Generación de series sintéticas

Una vez terminado de ajustar los modelos, descritos anteriormente, a series de tiempo ARMA (1,0), PARMA (1,0), se generaron series sintéticas anuales y luego series sintéticas mensuales a partir de la serie histórica anual y mensual de aportaciones, las series generadas serán los adecuados cuando las estadísticas importantes históricas y generadas sean comparadas, lo esencial de esta generación es la conservación de las propiedades estadísticas de la muestra histórica, como resultado cada muestra generada son igualmente probables que ocurran en el futuro (Sveinsson et al. 2009).

Debemos tener en cuenta que la finalidad de la generación sintética anual fue para analizar la posibilidad de implementar infraestructura para la regulación de los sistemas hídricos del río Santa (estación Condorcerro).

Por otro lado, la generación de las series sintéticas mensuales tuvo la finalidad de construir escenarios futuros para la gestión de la infraestructura planificada. Por supuesto que estos análisis estuvieron supeditados al cumplimiento de las garantías de las demandas de los sistemas. Se generará 1,000 series con escurrimientos sintéticos, cada una para un periodo de 50 años.

#### a. Series sintéticas anuales

Escriba el texto aquí

Con el modelo ARMA (1,0) ajustado anteriormente para los registros anuales de la estación Condorcerro se ha generado 1000 series sintéticas de 50 años cada una (suponiendo que es el periodo de diseño de la infraestructura de regulación), cuyos estadísticos resultantes han sido comparados con los estadísticos de la serie histórica, los mismos que se presentan a continuación.

El Cuadro 29 nos muestra que los estadísticos básicos de la serie histórica y la serie generada tienen bastante similitud, sobre todo en la media y desviación estándar. Con respecto a los valores mínimos de la serie generada son inferiores a los valores mínimos de la serie histórica, valores máximos de la serie generada son superiores a los valores máximos de la serie histórica, por lo tanto se esperaría que la mayoría de valores de aportaciones anuales en las series generadas sean inferiores y superiores a los valores de la serie histórica, lo cual no representa una desventaja dado que el análisis se realizará en las condiciones más desfavorables.

**Cuadro 29:** Comparación de estadísticos básicos de la Serie Histórica Anual y la Serie Sintética Anual Generada – Aportaciones de la estación Condorcerro

Estadísticos	Serie Histórica	Serie Generada
Media	4409	4399
Desv_Estand	1084	1065
CV	0.2459	0.2403
Sesgo	0.572	0.6149
Min	2678	2468
Max	7088	7422
acf(1)	0.1802	0.1508
acf(2)	0.02617	0.003471

**b. Series sintéticas mensuales**

Con la finalidad de realizar una comparación entre los estadísticos de la muestra histórica y los estadísticos de las series sintéticas, se han generado 1000 series de 60 meses cada una (50 años), para el modelo de media móvil PARMA (1,0) ajustado a la serie histórica mensual de la estación Condorcerro.

Debemos tener en cuenta que en esta investigación se decidió trabajar con un solo modelo y es donde se encuentren la mayor parte de meses resaltados según el criterio de Akaike Corregido, se seleccionó el PARMA (1,0).

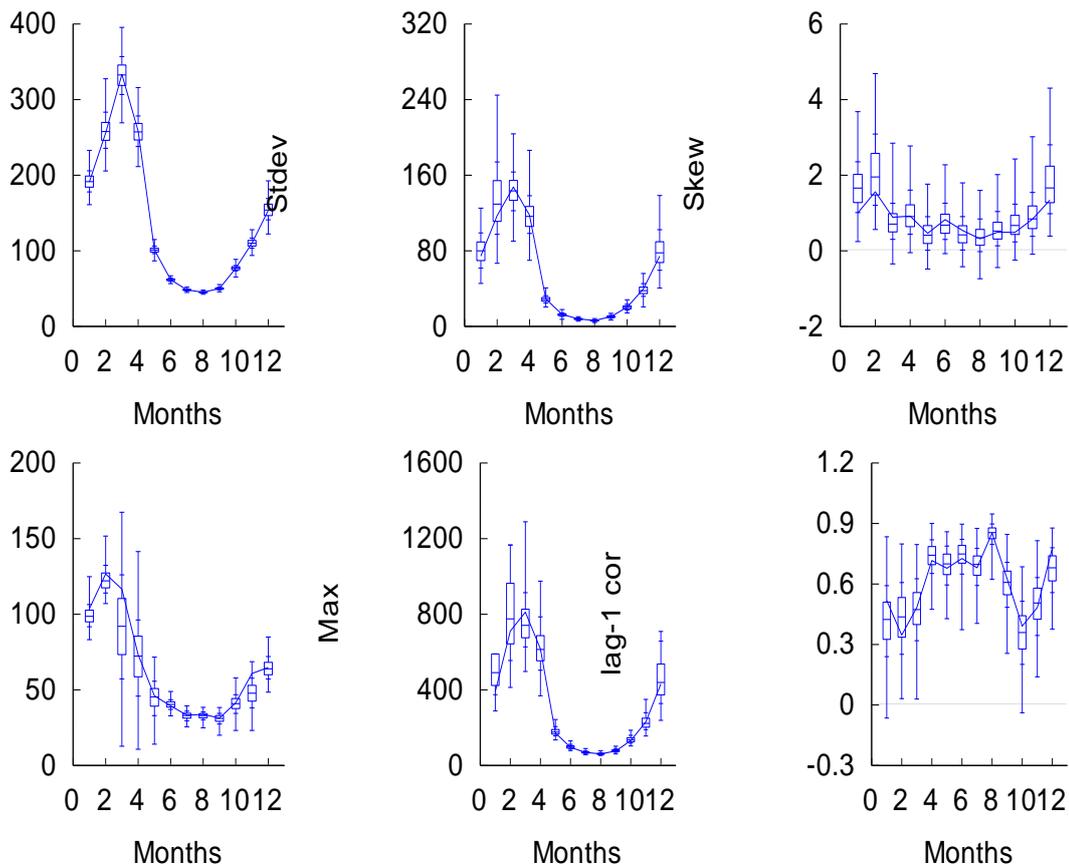
**Cuadro 30:** Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Condorcerro en m<sup>3</sup>/s

Mes	Media	Desv. estandar	Coef. variacion	Sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	191.1	74.44	0.3895	1.0032	103.6	390.4	-0.0366	-0.0357
Febrero	255.8	117.2	0.4584	1.5608	126.7	711	0.1	0.015
Marzo	333.4	147.5	0.4425	0.8883	116.6	811.2	-0.0658	0.0384
Abril	258.4	117.7	0.4554	0.9184	73.21	616.7	0.2044	0.0954
Mayo	101.2	29.08	0.2873	0.463	46.03	172	-0.0067	0.1248
Junio	61.85	12.74	0.206	0.8256	39.4	95.92	0.1989	0.1985
Julio	48.33	8.068	0.1669	0.5386	33.23	68.97	0.2471	0.2662
Agosto	45.23	6.3	0.1393	0.3175	33.78	61.3	0.4006	0.4576
Setiembre	50.19	10.36	0.2065	0.4924	31.38	76.01	0.4563	0.3646
Octubre	76.97	20.4	0.2651	0.4874	41.35	131.7	0.2701	0.1355
Noviembre	110.2	39.68	0.3602	0.8379	60.8	229.8	0.0991	-0.1826
Diciembre	153.5	74.35	0.4842	1.3423	64.8	431.3	0.0434	-0.0167

**Cuadro 31:** Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación

Condorcerro en m<sup>3</sup>/s

Mes	Media	Desv. estandar	Coef. variacion	Sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	191.9	81.51	0.4165	1.673	98.92	490.3	-0.01469	-0.02017
Febrero	258.8	137	0.5128	2.065	122.7	807.3	-0.01603	-0.02079
Marzo	332.6	144.9	0.4327	0.7614	91.44	758.9	-0.0174	-0.02503
Abril	257.9	118.2	0.4536	0.9697	71.55	630.7	-0.01591	-0.02961
Mayo	101.1	28.84	0.2836	0.4517	44.74	179.3	-0.02023	-0.02492
Junio	61.75	12.53	0.2014	0.736	40.37	98.57	-0.01311	-0.02338
Julio	48.31	7.914	0.1629	0.45	32.86	69.72	-0.01737	-0.0207
Agosto	45.23	6.227	0.137	0.3798	32.83	61.57	-0.0189	-0.02335
Setiembre	50.15	10.25	0.2031	0.5493	30.98	78.8	-0.01754	-0.02638
Octubre	77.01	20.44	0.2634	0.7102	40.74	137.2	-0.0174	-0.02264
Noviembre	110.1	38.7	0.3479	0.9186	47.81	230	-0.01291	-0.01896
Diciembre	154.5	80.97	0.5101	1.796	64.25	463.4	-0.00847	-0.01712



**Figura 14:** Comparación estadística de escurrimientos mensuales sintéticos e históricos.

Podemos observar en el Cuadro 30, Cuadro 31 que el modelo Parma (1,0) muestra una buena reproducción de los estadísticos de la serie histórica, no obstante los valores mínimos presentan una variación considerable para los dos modelaciones, pero esto no es una desventaja, dado que las series están generando valores menores, en cuyo caso estaríamos en las condiciones más desfavorables.

#### **4.2.4 Clasificación de escurrimientos sintéticos mensuales**

Se generaron 1,000 series con escurrimientos sintéticos para la Estación Condorccerro, cada una para un periodo de 50 años fueron generadas estocásticamente. Estas series representan diferentes realizaciones de escurrimientos durante este periodo.

Existen dos formas de utilizar esta información (Rodríguez 2012):

- Hacer un análisis estadístico de estas 1,000 series y seleccionar cierto número de series (cinco) que representen diferentes condiciones hidrológicas (muy seco, seco, normal, húmedo, muy húmedo) y utilizar esta selección de series para evaluarlas en el modelo de planeación WEAP.
- Utilizar las 1,000 series en el modelo de planeación WEAP, y después hacer el análisis de los 1,000 modelos de planeación evaluados.

En esta investigación se seleccionó utilizar el primer método, ya que es más rápido y práctico trabajar con un número selecto de series en el modelo de planeación que analizar a priori las 1,000 series de escurrimientos sintéticos.

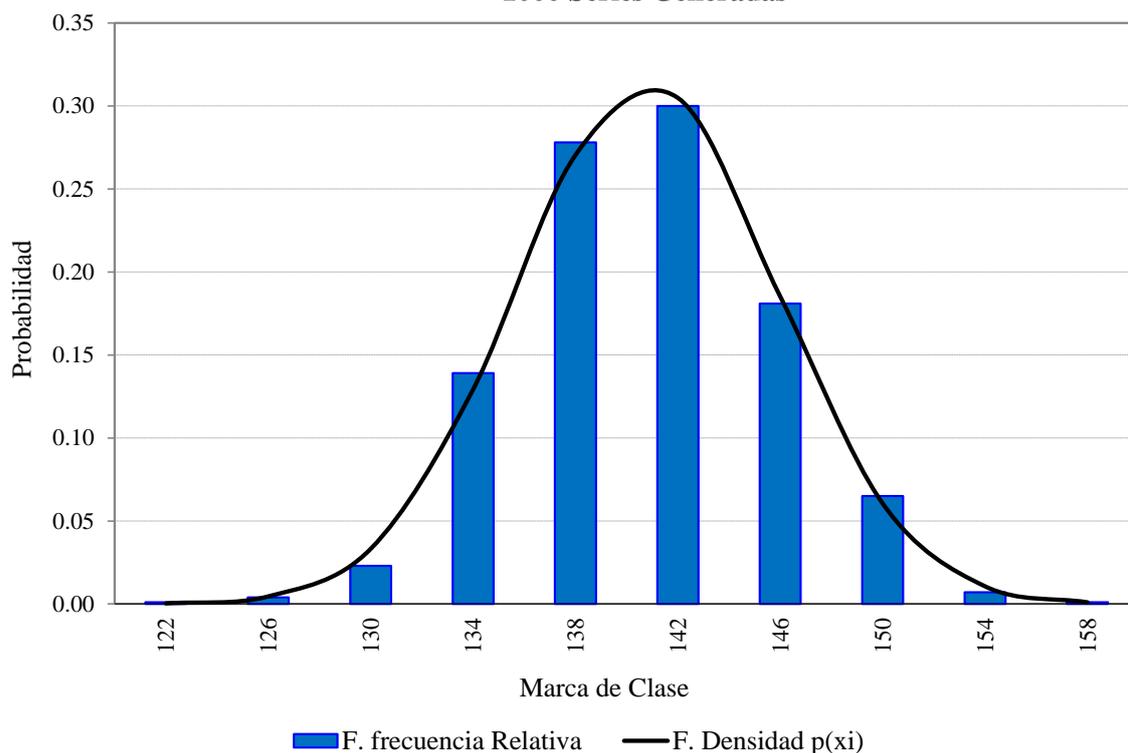
Este tipo de análisis se realizó para todas las demás estaciones que están comprometidas en la investigación las cuales son: (Chorobal – Huamanzaña, Huacapongo – Sifón Virú, Quirihuac – Moche, Salinar – Tambo, San Jacinto, Sector Tutuma, Puente Quillo).

El resultado del análisis y el número de serie seleccionada para cada condición hidrológica se presenta en el Anexo 1.

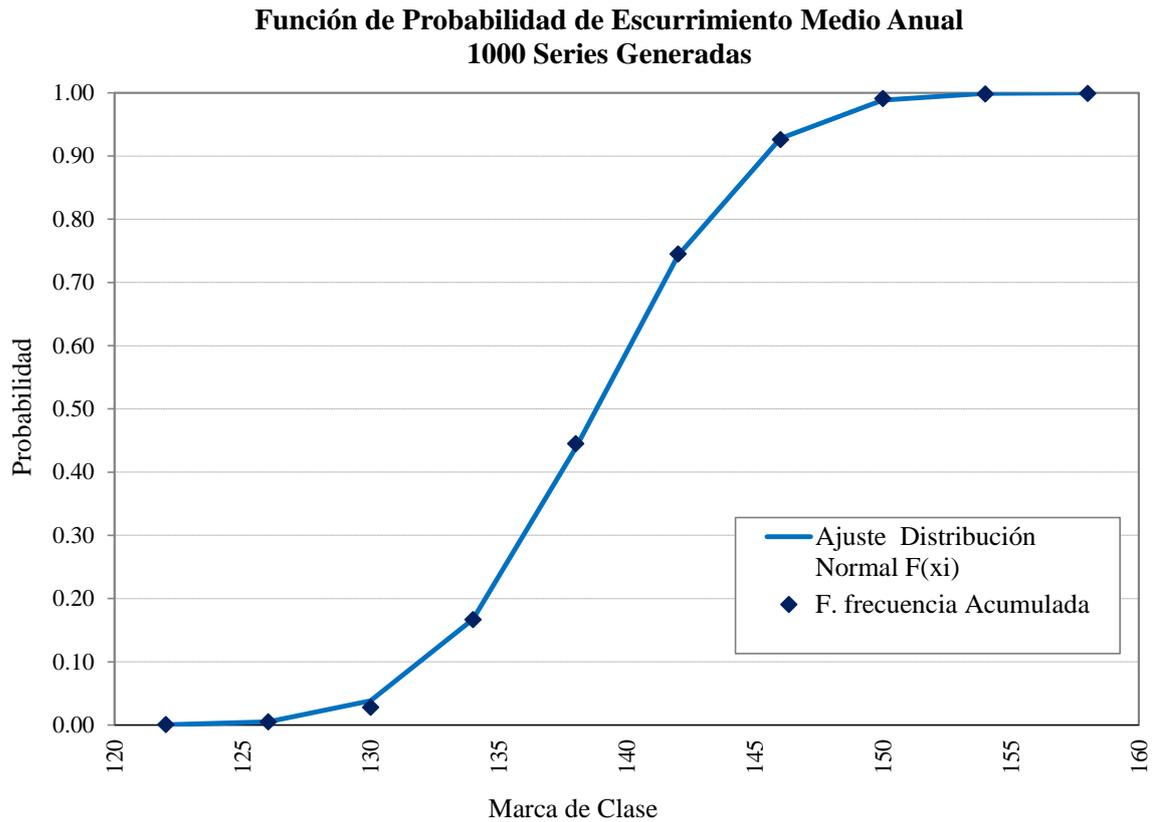
**Cuadro 32:** Análisis estadístico de Series Sintéticas para su uso en el modelo de planeación, Estación Condorcero

Nº	LC Inferior	LC Superior	Qmedio Anual	Clase	Frecuencia	F. frecuencia Relativa	F. frecuencia Acumulada	Nº Serie Generada	Distribución Normal F(xi)	F. Densidad p(xi)
1	120.00	124.00	122.00	124.00	1	0.00	0.0010	711.00	0.00035	0.000
2	124.00	128.00	126.00	128.00	4	0.00	0.0050	624.00	0.00493	0.005
3	128.00	132.00	130.00	132.00	23	0.02	0.0280	290.00	0.03815	0.033
4	132.00	136.00	134.00	136.00	139	0.14	0.1670	512.00	0.16736	0.129
5	136.00	140.00	138.00	140.00	278	0.28	0.4450	794.00	0.43774	0.270
6	140.00	144.00	142.00	144.00	300	0.30	0.7450	107.00	0.74256	0.305
7	144.00	148.00	146.00	148.00	181	0.18	0.9260	187.00	0.92774	0.185
8	148.00	152.00	150.00	152.00	65	0.07	0.9910	178.00	0.98831	0.061
9	152.00	156.00	154.00	156.00	7	0.01	0.9980	567.00	0.99895	0.011
10	156.00	160.00	158.00	160.00	1	0.00	0.9990	776.00	0.99995	0.001
11	160.00			y mayor.	1	1.00				

**Distribución de Probabilidad de Esguimiento Medio Anual  
1000 Series Generadas**



**Figura 15:** Distribución de probabilidad del esguimiento medio anual de las 1,000 series.



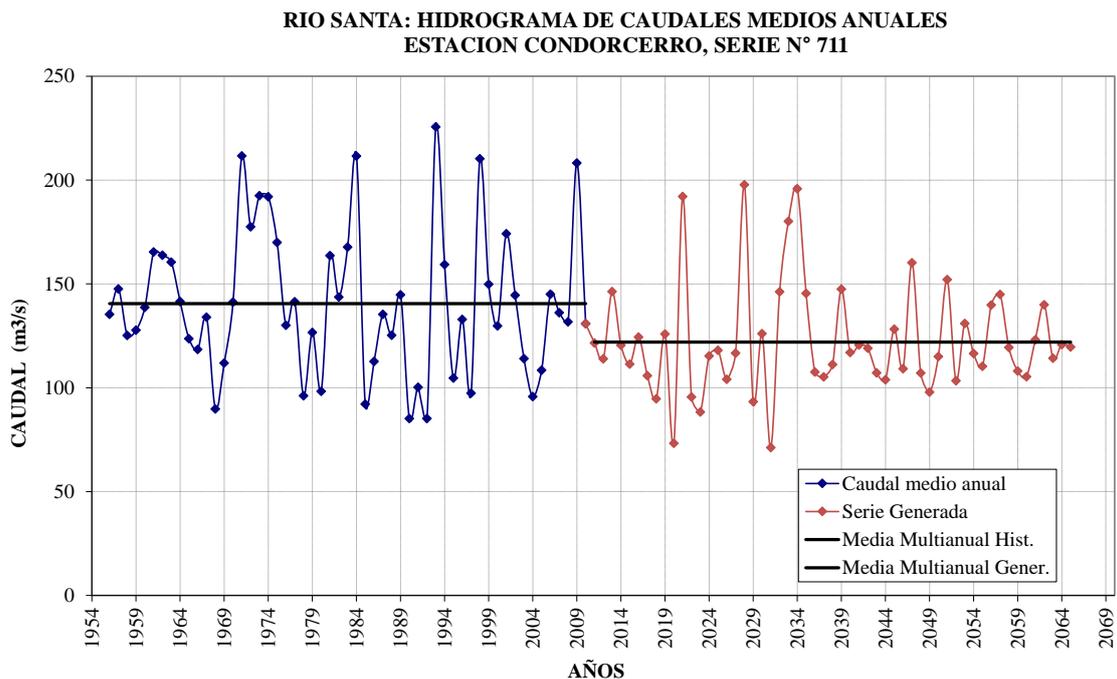
**Figura 16:** Función de probabilidad del esguerrimiento medio anual de las 1,000 series.

La Figura 15 muestra la distribución de probabilidad de esguerrimiento mientras que en el Cuadro 32 se muestran los análisis estadísticos realizados a los esguerrimientos medios anuales de las 1,000 series sintéticas. En este análisis se aprecia que los esguerrimientos generados siguen una distribución normal con valores  $\sigma = 4.9508$   $\mu = 140.78$ .

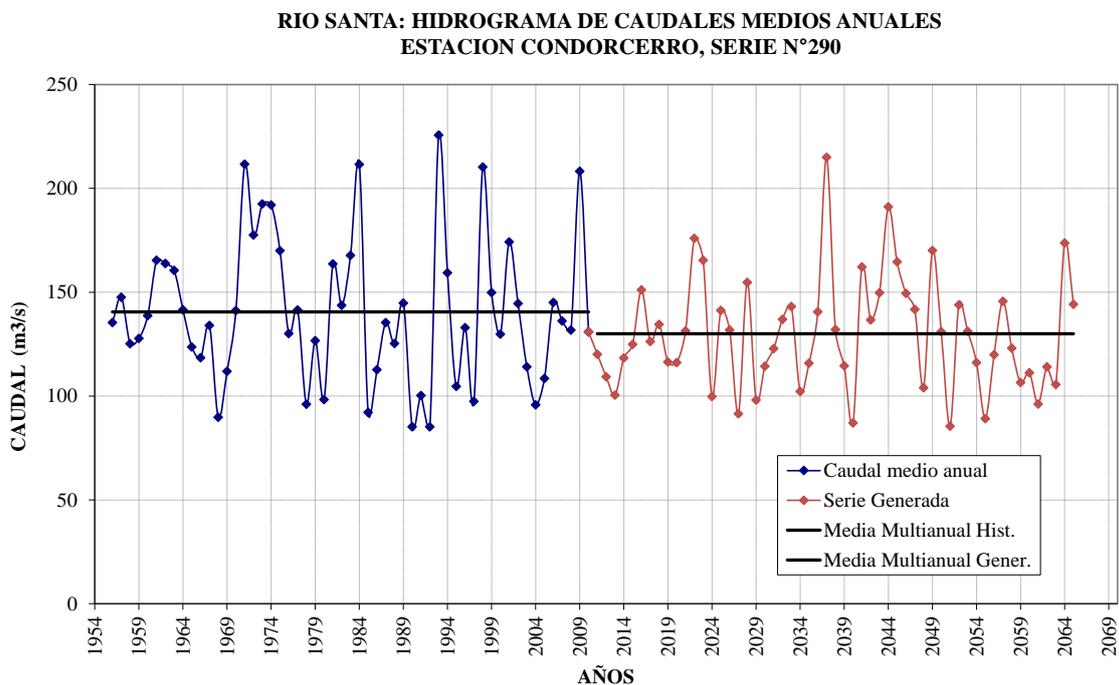
A continuación se muestra en la Cuadro 33 las series sintéticas seleccionadas como condiciones hidrológicas que serán usadas en el modelo de planeación WEAP.

**Cuadro 33:** Secuencias seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Condorcerro

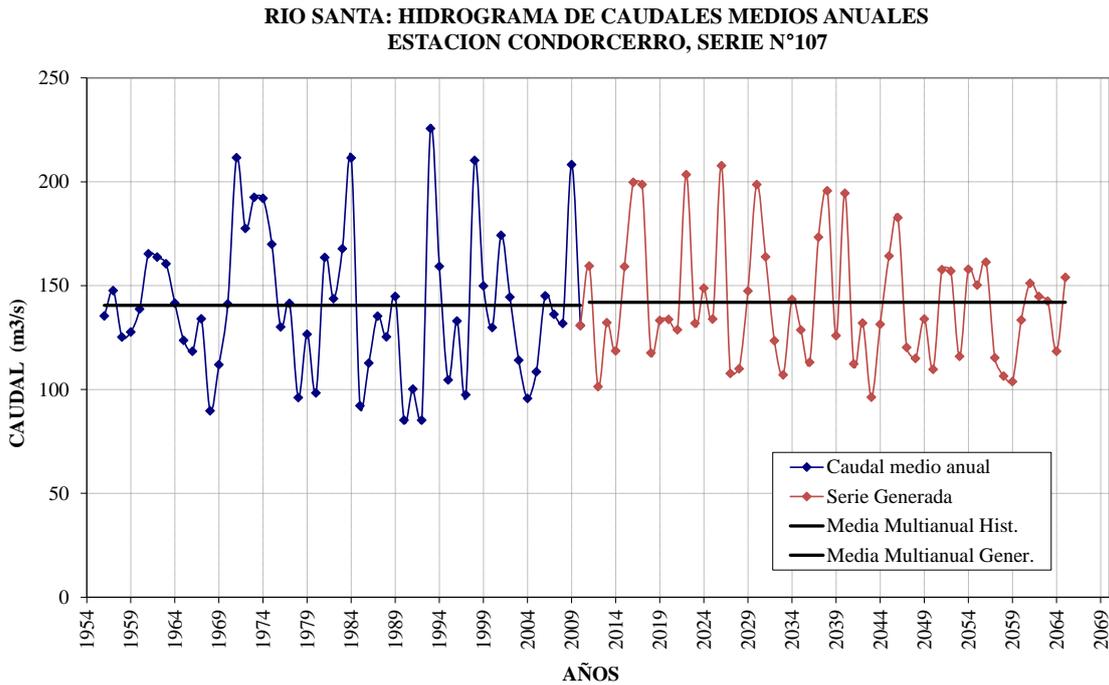
Secuencias	Condición Hidrológica	Nº Serie Generada
Secuencia 1	Muy Seco	711
Secuencia 3	Seco	290
Secuencia 6	Normal	107
Secuencia 9	Húmedo	567
Secuencia 10	Muy Húmedo	776



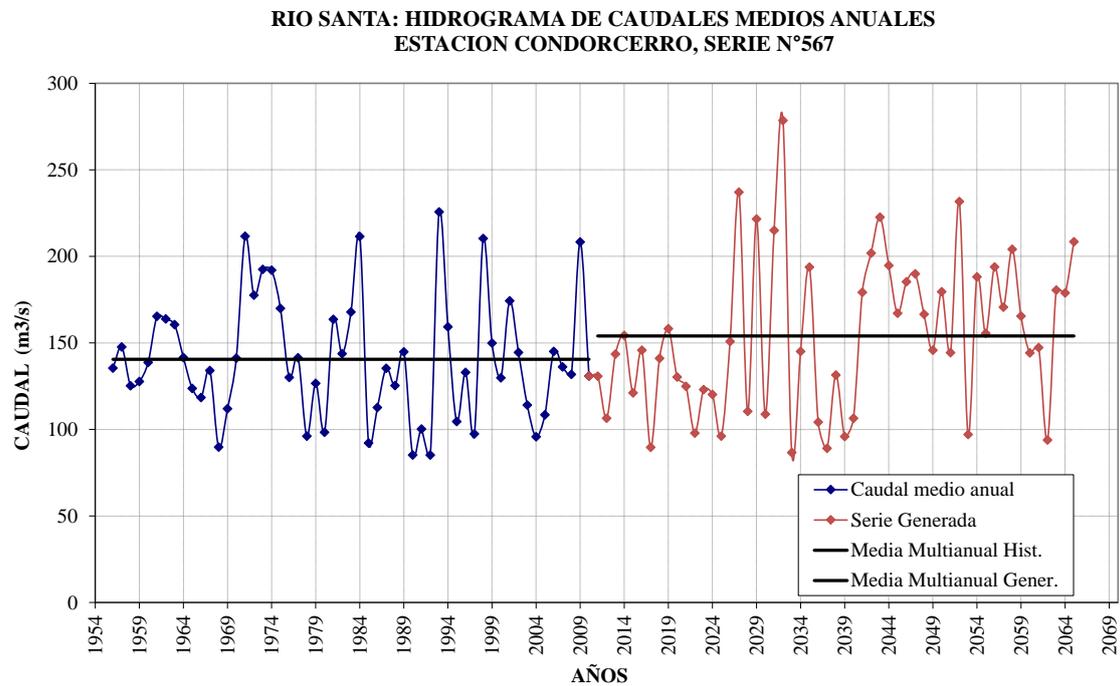
**Figura 17:** Escurreimientos sintéticos; Serie. #711, Media=122 m<sup>3</sup>/s, F (Q < X) =0.035%.



**Figura 18:** Escurreimientos sintéticos; Serie. #290, Media=130 m<sup>3</sup>/s, F (Q < X) =3.85%.

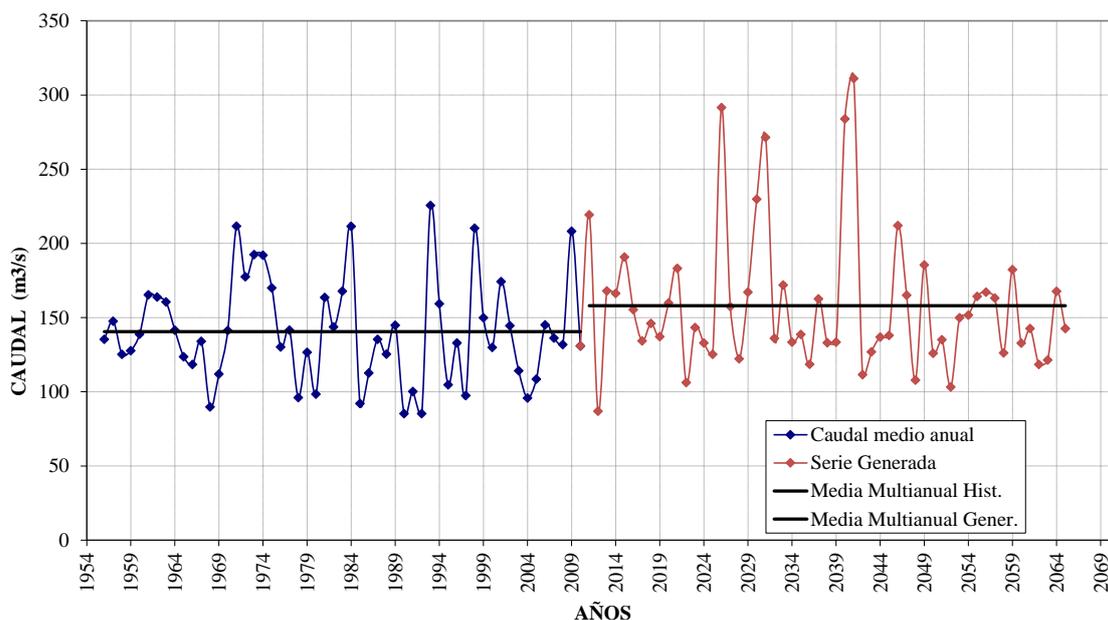


**Figura 19:** Escurrecimientos sintéticos; Serie. #107, Media=142 m<sup>3</sup>/s, F (Q < X) =74.2%.



**Figura 20:** Escurrecimientos sintéticos; Serie. #567, Media=154 m<sup>3</sup>/s, F (Q < X) =98%.

**RIO SANTA: HIDROGRAMA DE CAUDALES MEDIOS ANUALES  
ESTACION CONDORCERRO, SERIE N°776**



**Figura 21:** Escurrimientos sintéticos; Serie. #776, Media=158 m<sup>3</sup>/s, F (Q < X) =99%.

### 4.3 SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ACUÍFERO DE CHAO

#### 4.3.1 Construcción del modelo conceptual

Una vez caracterizada la zona de estudio la cual se encuentra en el Anexo 2, se puede desarrollar el modelo conceptual. Éste sirve para simplificar el problema, organizar los datos de campo y facilitar la solución del problema. En el modelo conceptual del acuífero de Chao se contempla la definición de las unidades hidroestratigráficas, la esquematización del balance de agua y la definición del sistema de flujo.

En el modelo conceptual de flujo se han establecido los siguientes aspectos:

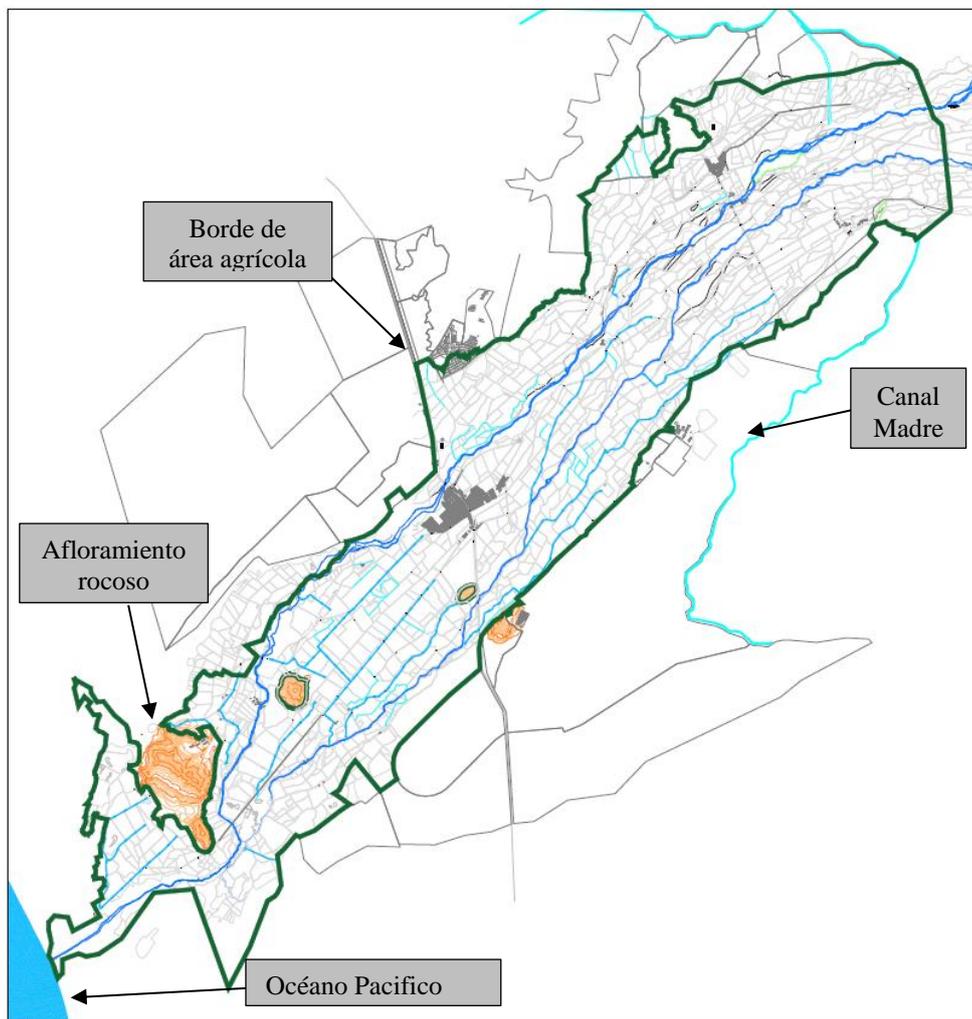
##### a. Dominio del sistema

El acuífero está limitado lateralmente por las formaciones rocosas representadas por cerros que afloran en ambos lados y también por grandes cerros testigos; como Chao, Carretero, Jaime, Ganoza, Dos Tetos, Huarango, Huasaquito, Huarpe, Arenoso.

El acuífero a partir del sector San León, tiene un ancho de 4.00 Km, posteriormente en el sector de Turbinzal presenta un ancho de 6.00 Km el mismo que se va ensanchando progresivamente hasta el litoral donde tiene un ancho promedio de 8 Km.

Se consideró tres aspectos para definir el dominio:

- El dominio del sistema ha considerado cubrir la mayor área de interés, donde se puedan encontrar la mayor cantidad de pozos.
- El dominio tiene que ser lo suficientemente grande como para que las condiciones de borde no influyan de manera significativa en la dirección de flujo de agua.
- La investigación considerara las condiciones de borde naturales, bordes geológicos (afloramientos rocosos), los cursos de agua (ríos, drenes), cuerpos de agua grande (mar).



**Figura 22:** Esquema de zona seleccionada.

## **b. Capas del acuífero**

Las unidades estratigráficas reconocidas están constituidas principalmente por materiales aluviales cuaternarios compuesto de cantos rodados, gravas y guijarros en matriz arenociloso por donde discurre el agua subterránea, en consecuencia la zona presenta dos horizontes bien marcados:

- Un horizonte superior, un horizonte de material más grueso de buena permeabilidad relativa que llega hasta los 40 m, muy favorable al flujo subterráneo y que, por estar en contacto con la atmósfera, se le considera como el acuífero libre y constituye el dominio de la napa freática.
- Un horizonte inferior, Compuesto de materiales finos de baja permeabilidad; su espesor se extiende frecuentemente entre 100 m y 120 m, para luego encontrar el basamento por la elevación brusca de la resistividad.

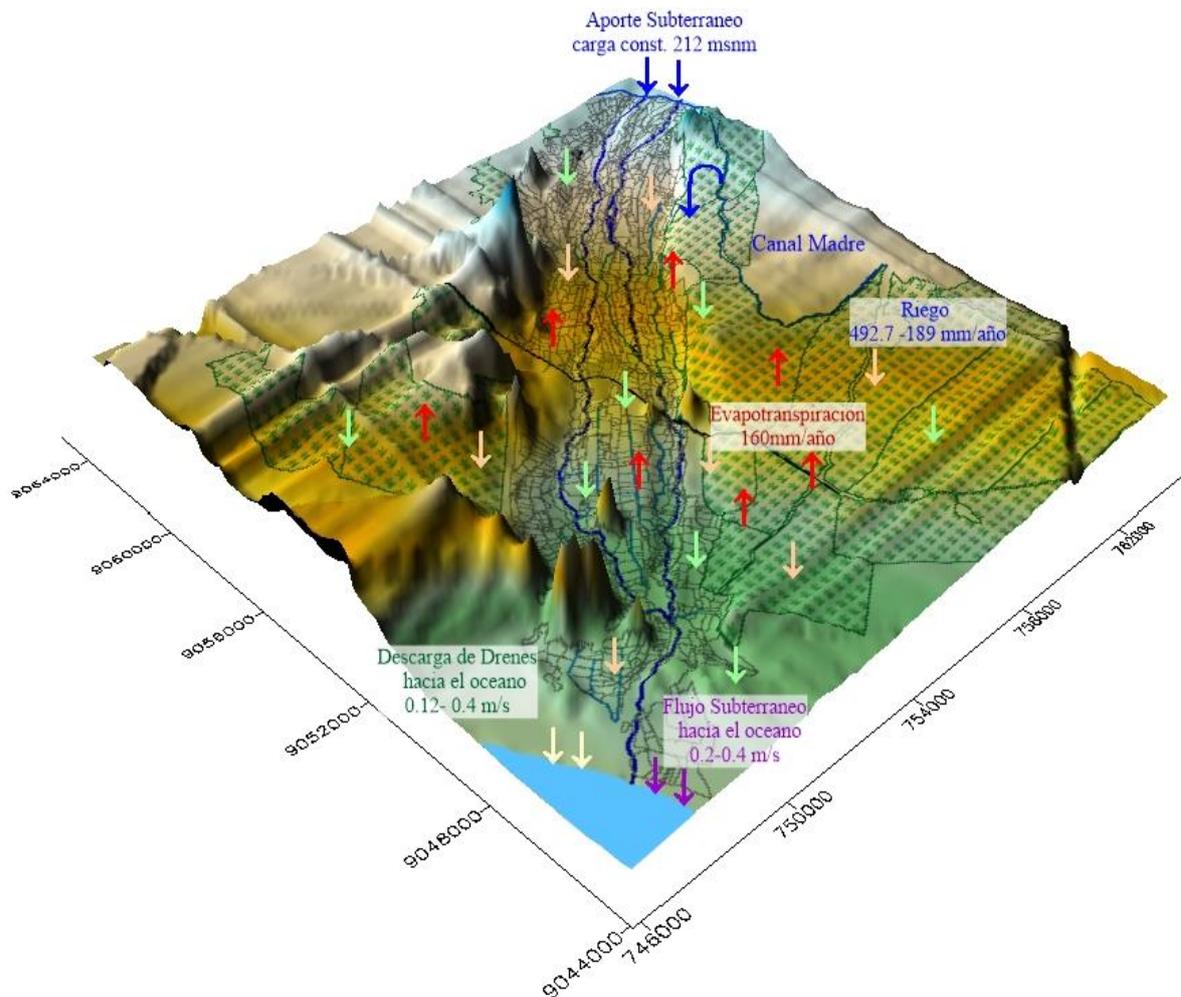
Desde el punto de vista de producción de agua, el horizonte superior es el que ha venido siendo explotado desde hace más de 50 años y es esta capa la que será modelada a diferentes escenarios de explotación mediante pozos de bombeo a fin de garantizar su máximo rendimiento y equilibrio. Al modelo se introdujo el valor del nivel del basamento y de la superficie del terreno. Los valores del basamento se introdujeron al modelo como un archivo tipo txt (x,y,z).

## **c. Entradas y salidas del agua del sistema**

Las entradas de agua están constituidas en este sistema, por las zonas de carga constante en los límites noreste del sistema a la altura del canal madre que es el agua subterránea que proviene de la parte alta de la cuenca, las posibles aportaciones del río Chorobal y Huamanzaña al acuífero en el límite norte, y la recarga debida fundamentalmente a las áreas de riego, que se aplica sobre la capa superior de toda la extensión del sistema.

Como salidas del sistema se han considerado; la extracción por pozos de bombeo, los drenes y ríos donde la salida de agua es hacia el mar, y la evapotranspiración desde zonas con niveles de agua subterránea elevados.

En la Figura 23 se precia la topografía del lugar, los afloramientos rocosos en la parte baja de la cuenca interrumpen el libre tránsito del agua por el acuífero, además de las entradas y salidas del sistema, así como también las áreas de riego en expansión.



**Figura 23:** Modelo Conceptual del acuífero de Chao.

### 4.3.2 Construcción del modelo matemático

Para llevar a cabo la modelación del flujo subterráneo se seleccionó un modelo tridimensional, para un acuífero libre en estado estacionario y transitorio. En simulaciones donde se involucra un acuífero libre, como en este caso, el nivel estático forma parte de la frontera. Para la realizar la modelación numérica se requiere especificar la variación espacial de la conductividad hidráulica, el rendimiento específico y la elevación del basamento.

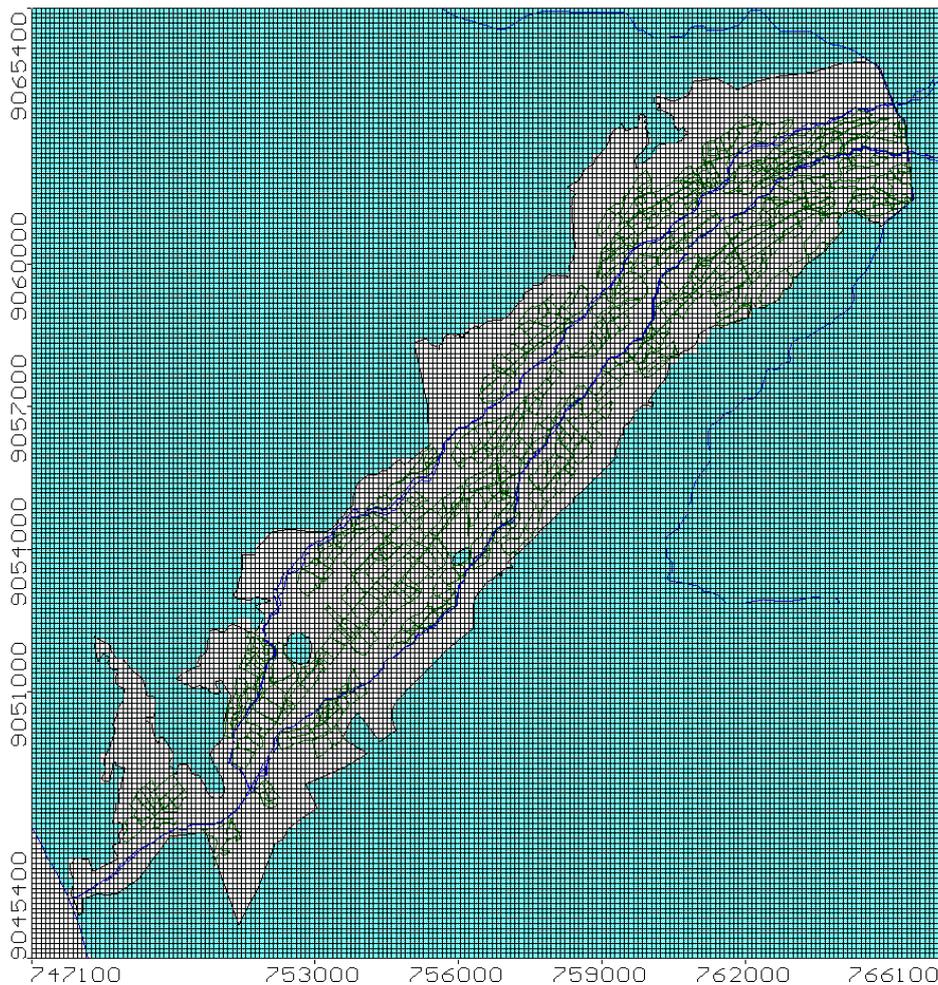
En el modelo matemático el dominio del sistema se encuentra discretizado mediante un mallado tridimensional que estructura el sistema en celdas o mallas, cada una de ellas con sus características definidas (permeabilidad, carga hidráulica, almacenamiento, etc). En esta investigación se ha empleado Visual Modflow 3.0 como aplicación para el desarrollo del modelo matemático.

Los mapas se han georeferenciado empleando coordenadas UTM, tomándose como origen del modelo el punto al que corresponden las coordenadas  $X_{UTM}=747100$  m e  $Y_{UTM}=9045400$  m. La extensión del modelo cubre un área de 19,000 m dirección O-E y 20,000 m dirección S-N.

**a. Discretización espacial: diseño de la malla del modelo**

La introducción de las coordenadas del área a modelar, como los dibujos de referencia que deseen emplearse, pueden ser importados a partir de ficheros DXF.

Para la discretización horizontal se han realizado espaciamientos uniformes en la malla, creando celdas de 100x100 metros. Teniendo en cuenta las dimensiones del dominio se establecieron 190 columnas ( $19,000/100$ ) y 200 filas ( $20,000/100$ ), teniendo un total de 38,000 mallas habiendo cubierto  $380.0 \text{ Km}^2$  de superficie.



**Figura 24:** Mallado de la zona de estudio (190 columnas x 200 filas).

No se llegó a dar un mayor refinado de la malla, porque se ha comprobado el buen funcionamiento del modelo y porque una mayor resolución supone un mayor costo en memoria y tiempo de simulación computacional. Para la discretización vertical cabe recordar que el acuífero es de una sola capa.

#### **b. Discretización temporal: paso de tiempo**

Para poder analizar el comportamiento de las cargas hidráulicas en el tiempo, fue necesario realizar una simulación en régimen transitorio. Para ello se analizaron veinticinco periodos de tiempo con 10 pasos de tiempo por periodo. Los periodos comprendieron del 1 de enero de 2001 al 31 de diciembre de 2019. La discretización temporal es tomada en cuenta al momento de introducir las fuentes de recarga y descarga al acuífero. La condición inicial fue tomada de la configuración de la elevación del nivel estático para setiembre 2001.

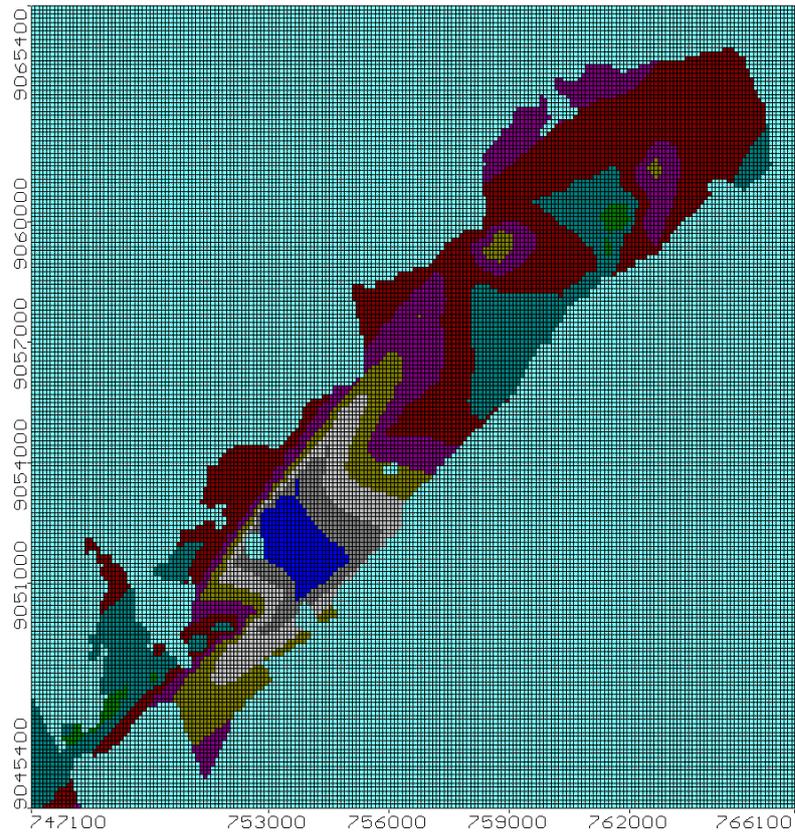
#### **c. Asignación de propiedades al acuífero**

En primer lugar se definió la conductividad hidráulica teniendo en cuenta las características hidrogeológicas del sistema. A la capa superior que constituye el acuífero, se le asignó el valor de la conductividad hidráulica (K) obtenida en los ensayos de bombeo; Se asumió en la capa del acuífero tiene la propiedad de ser anisotrópico y heterogeneo,  $K_{x1}=K_{y1}\neq K_{z1}$ ,  $K_{x1}\neq K_{x2}\neq K_{x3}$  tanto para y, z respectivamente.

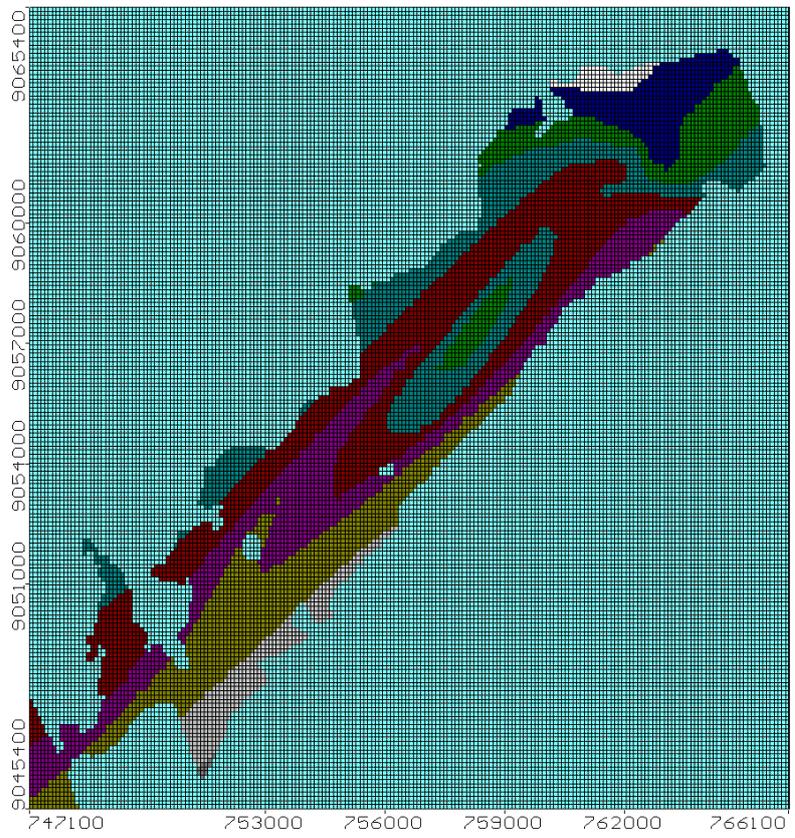
Junto a la conductividad hidráulica, se asignó al modelo matemático el valor del coeficiente de almacenamiento estimado en los ensayos de bombeo, además para acuíferos libres, se requiere el coeficiente de rendimiento específico  $S_y$ , y valores para la porosidad efectiva.

Los valores de almacenamiento específico, rendimiento específico, porosidad eficaz y porosidad total se asignaron a cada unidad geológica, basados en resultados de ensayos de bombeo (para  $S_s$  y  $S_y$ ).

Al igual que las conductividades hidráulicas, las propiedades de almacenamiento específico, rendimiento específico, porosidad eficaz y total se cargaron en el modelo importando los archivos en formato txt (x,y,z), para su posterior interpolación por el modelo matemático Visual Modflow.



**Figura 25:** Conductividad hidráulica.



**Figura 26:** Almacenamiento.

#### **d. Asignación de las condiciones de borde**

Las condiciones de borde establecen las entradas y salidas de agua del sistema, se han definido condiciones de borde del tipo: carga constante, río, dren y recarga.

En cualquier momento de la modelización, pueden definirse cuantos mapas de referencia que deseen en archivos DXF, facilitando la definición de los parámetros hidrogeológicos.

#### **Bordes impermeables**

Con base en las características geológicas del sistema acuífero, se definieron los bordes impermeables del modelo, los cuales representan las condiciones de entrada y salida de flujo nulos al modelo.

Por esta razón, cuando las condiciones de borde definen los límites del dominio, como es en este caso, las celdas que se encuentren fuera de este dominio deben ser designadas como inactivas. Las celdas así definidas son ignoradas por el modelo y no son incluidas en las subrutinas de cálculo de flujo.

#### **Carga constante**

En los límites noreste y suroeste del modelo (Figura 27, condiciones de frontera) se han definido celdas de carga constante. En estas celdas se establece que a lo largo de todo el periodo de simulación (desde  $t=0$  hasta  $t=6935$ ), la altura del nivel freático se mantiene constante, y constituye por tanto la entrada principal de agua al sistema. La carga de cada celda se ha establecido a partir de las mediciones en campo resultando los hidrogramas de pozos de observación. No obstante a lo largo del proceso de calibración del modelo de flujo, fue necesario realizar ajustes sobre los valores inicialmente propuestos.

#### **Río**

Como muestra la Figura 27, las celdas azules corresponden a la zona en la que los ríos Chorobal y Huamanzaña atraviesan el valle de Chao hasta desembocar en el Océano Pacífico. En función del nivel piezométrico del acuífero y del nivel de la superficie del río, éste puede funcionar como elemento que aporte o que retire agua del sistema. Por ello fue necesario establecer, en cada una de la celda tipo río, los valores correspondientes a la elevación de la superficie de agua del río ( $H_{rio}$ ), a la elevación ( $B_{rio}$ ), espesor ( $M$ ) y conductividad vertical ( $K_z$ ) del lecho del río, y anchura del río ( $W$ ).

Los valores de la anchura y elevación de la superficie del río y del lecho del río se midieron y estimaron, para cada celda, a partir de imágenes satelitales y de fotografías de la zona indicada de los ríos Chorobal y Huamanzaña. El valor del espesor del lecho del río (M), se estimó en 5 metros y el de la conductividad hidráulica del lecho (Kz) en 1.2 m/día. Esta estimación se realizó teniendo en cuenta los materiales que constituyen el lecho del río y el tamaño del mismo.

A partir de esta información Visual Modflow estima el valor de la conductancia (C), un parámetro que representa la resistencia al intercambio de flujo entre el agua del río y el agua del acuífero a través del lecho del río.

### **Drenes**

La infraestructura de drenaje en el valle de Chao, construido por el Proyecto Especial Chavimochic, contribuyeron a mitigar los efectos del fenómeno El Niño 1997-1998, y a que no se continúen incrementando los problemas de saturación en especial las zonas bajas, éstos cumplieron su función de evacuar los excesos drenables y en algunos casos se comportaron como evacuadores de agua superficial.

Las celdas tipo dren retiran agua del sistema si la carga excede un cierto umbral o altura. La velocidad de drenaje o retirada de esta agua del sistema será mayor cuanto mayor sea la diferencia entre el nivel piezométrico del acuífero y la elevación establecida como altura de drenaje.

Todos ellos descargan hacia los ríos Chorobal y Huamanzaña. Esta condición de frontera implica el conocimiento de una gran cantidad de información que muchas veces no es posible obtenerla, por lo que la conductancia de los drenes suele ser un valor que se determina con la calibración del modelo.

La información de los drenes asignados en el modelo fue tomada del Estudio Factibilidad Chavimochic, en la Figura 27 se muestra su ubicación.

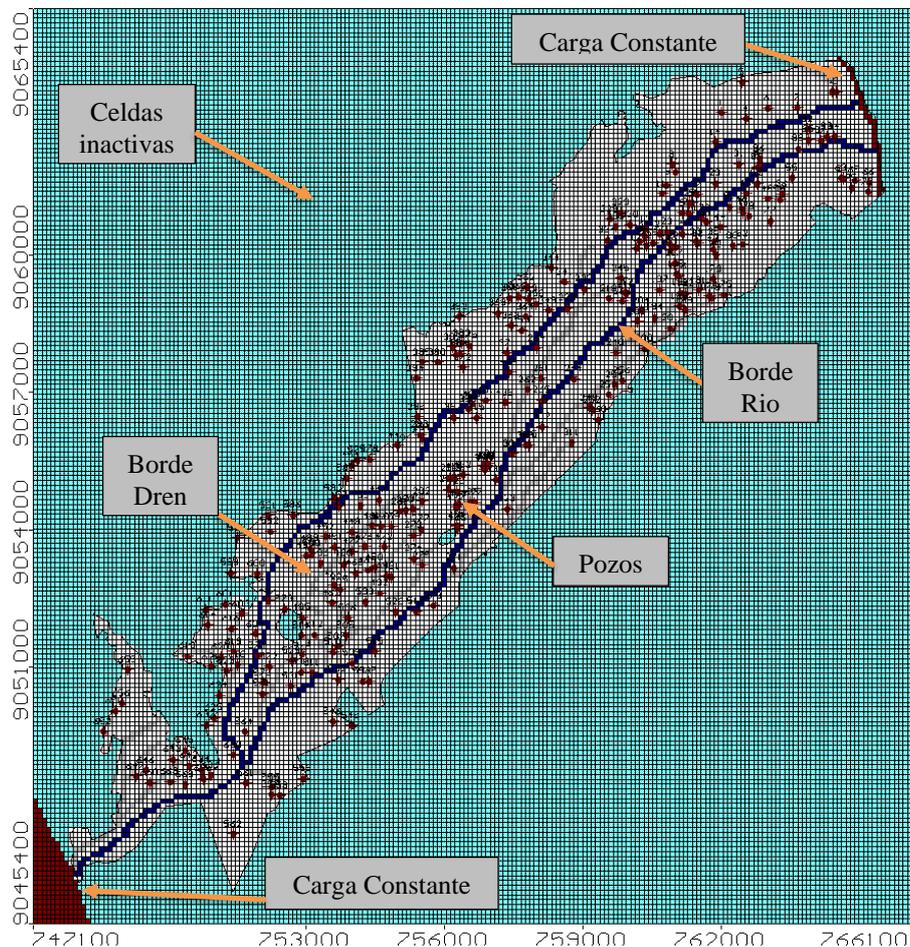
### **Recarga**

Corresponden básicamente las intensidades de recarga a través de áreas bajo riego por gravedad en el valle viejo y las áreas nuevas para riego tecnificado en donde hay infiltración en las conducciones, en la aplicación del agua, sistemas de limpieza - purga para el tratamiento de la turbiedad.

## Pozos de bombeo

La extracción por bombeo se determina sobre la base de la información del inventario de pozos realizado por el INRENA en 1998. Los pozos utilizados en la construcción del modelo fueron 281 y con los cuales se realizó el proceso de calibración la mayor cantidad de pozos se concentra en la parte central del acuífero modelado. Los caudales de los pozos se registraron en cada nodo con sus coordenadas geográficas.

Los caudales por bombeo al inicio de la calibración se consideraron al mes de setiembre del 2001 que corresponde a  $104,927.71 \text{ m}^3/\text{mes}$  o el equivalente a  $3384.75 \text{ m}^3/\text{dia}$ .



**Figura 27:** Condiciones de frontera.

## Evapotranspiración

Análogamente a la recarga por lluvias, se produce una descarga del acuífero más o menos intensa en función de factores medio ambientales y climáticos del entorno. La

evapotranspiración es la pérdida de agua de la zona saturada del sistema, por acción de la evaporación directa y la transpiración de las plantas.

La evapotranspiración simulada dependerá solo de la disponibilidad de agua en el suelo. Cuando el nivel piezométrico supera la superficie del terreno, se produce la máxima evapotranspiración al ser máxima la disponibilidad. Cuando se encuentra entre la superficie y una profundidad denominada de extinción de evapotranspiración, varía linealmente con la profundidad, el valor de pérdida es de 160 mm/año

La Profundidad de extinción suele variar entre 1 y 2,5 m. aunque en algunos casos puede ser mucho mayor, dependiendo del clima, en esta investigación se definió en 2 m.

### **4.3.3 Calibración del modelo de flujo**

Un modelo se encuentra calibrado cuando es capaz de reproducir, fielmente, la evolución de niveles de agua y balances hídricos observados en la realidad. El proceso de calibración consiste en la simulación iterativa del modelo, modificando las condiciones de contorno, iniciales y/o parámetros hidrogeológicos (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, caudal, etc.), con el fin de reducir la discrepancia existente entre los valores calculados por el modelo y los registrados en campo.

#### **a. Condiciones de ejecución del modelo de flujo**

La simulación del modelo de flujo se ha realizado en estado estacionario y transitorio, utilizando como valores iniciales las cargas hidráulicas y como solucionador numérico de las ecuaciones de flujo, el método WHS Solver (Waterloo Hydrogeologic 2002) por ser más rápido y tener una convergencia mucho más suave que los otros métodos. Este método además, pre condiciona la ecuación matricial para dar una solución más eficiente. Contempla 2 niveles de factorización, que permiten a las matrices ser inicializadas en forma diferente para incrementar la eficiencia y estabilidad de la solución del modelo. Un nivel 1 donde se requieren menos iteraciones, pero mayor memoria de la computadora y otro nivel 10, donde es necesaria menos memoria pero se realiza mayor número de iteraciones.

Este solucionador, como el resto de solucionadores disponibles, aproxima la solución de un gran número de ecuaciones de derivadas parciales de forma iterativa a través de una solución aproximada.

Los parámetros utilizados como criterio de solución del modelo son mostrados:

- Máximo número de iteraciones externas: 500
- Máximo número de iteraciones internas: 50
- Criterio de convergencia en el cambio de carga: 0.6
- Criterio de convergencia en el error residual: 0.01
- Factor de variación para iteraciones externas (damping factor): 0.4
- Criterio de residual relativo: 0
- Nivel de factorización: 0

#### **b. Método de calibración del modelo de flujo**

La calibración se realizó por el método de prueba y error, comparando niveles piezométricos simulados y observados. Los parámetros de calibración utilizados para alcanzar un ajuste aceptable entre los valores observados y simulados fueron la carga hidráulica y los flujos prescritos en los bordes, la tasa de recarga, la conductancia y cotas de los ríos y las propiedades de conductividad hidráulica y almacenamiento.

Durante el proceso de calibración surgieron ciertos problemas de convergencia. El primero de ellos fue atribuible a la generación automática de la malla tridimensional por capas, que resultó que en una misma capa celdas contiguas estuvieran desconectadas hidráulicamente unas de otras, y por lo tanto a Modflow le resultaba imposible calcular conductancias y, por ende, flujos entre celdas. Esto se solucionó con la herramienta “smoothing” en el módulo INPUT de la grid. La misma situación de celdas no conectadas también causó que se generaran muchas celdas secas, causando la no convergencia del modelo, pero una vez que la grid se suavizó en ambos sentidos, en X e Y, ya no se produjeron problemas de no convergencia.

#### **c. Régimen de simulación de flujo**

##### **Régimen estacionario**

El modelo se calculó en estado estacionario y fue calibrado usando niveles estáticos de setiembre del 2001, como condición inicial y teniendo en cuenta el modelo conceptual

empleado. El acuífero de Chao fue modelado con 24 puntos de información de la conductividad hidráulica y 11 puntos almacenamiento diferentes, además de la recarga debida a la infiltración del riego por gravedad en valle de Chao y el aporte subterráneo de la cuenca alta.

### **Régimen transitorio**

Conocido el valor de la carga que mejor calibra el modelo, sin modificar este parámetro será considerado como carga inicial en el modelo transitorio, en esta fase se procede a calibrar los parámetros hidrogeológicos que definen la conductividad y el almacenamiento del agua en el acuífero para los 7 años de periodo.

El modelo se calculó en estado transitorio y fue calibrado usando niveles estáticos medidos desde el año 2001 al 2007 y como condición inicial setiembre 2001, teniendo en cuenta el modelo conceptual empleado. El acuífero de Chao fue modelado en base a una interpolación de los 24 puntos de conductividad hidráulica y 11 puntos almacenamiento, además de la recarga debida a la infiltración del riego por gravedad en valle y el aporte subterráneo de cuenca alta.

#### **d. Análisis de la calibración**

La aceptabilidad de una calibración es una medida subjetiva puesto que cada modelo tiene diferentes objetivos y debe ser calibrado en diferentes condiciones. Sin embargo, hay algunos métodos comúnmente aceptados para evaluar e interpretar la calibración usando criterios cuantitativos. En este trabajo se ha analizado la correlación de residuos (datos observados frente a datos estimados) y el balance hídrico del sistema (balance de materia).

#### **Grafica de datos calculados vs. Datos observados**

El número de puntos (pozos de observación) empleados para la calibración ha sido de 57.

El resultado de la media residual  $R$  da un valor, no obstante este valor puede ser engañoso, ya que los residuales positivos (sobre-calculados) y negativos (sub-calculados) pueden restarse y compensarse dando un valor próximo a cero. Por esta razón se emplea también la media residual absoluta,  $|R|$ , en la que se considera el valor absoluto del residual.

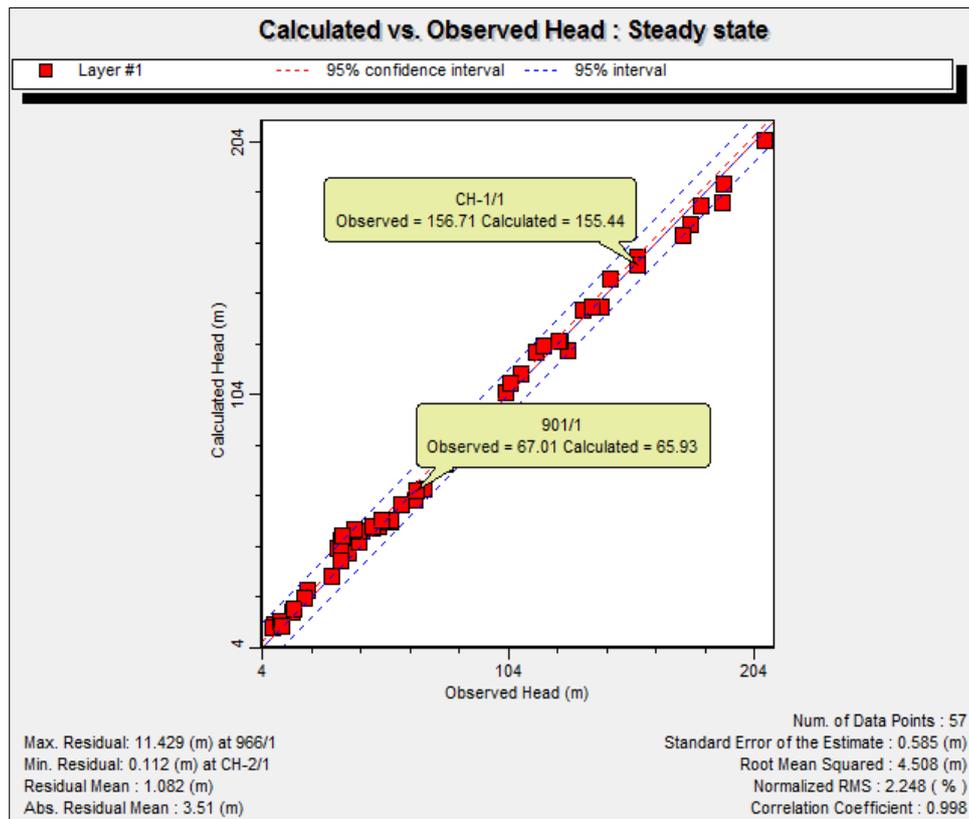
Visual Modflow también calcula el error estándar de la estimación (SEE) y el promedio de la raíz de los cuadrados de los residuales (Root Mean Squared Residual–RMS).

Régimen estacionario:

El punto que presentó mayor diferencia entre el valor estimado y el observado, es decir mayor residual, fue el Pozo IRHS 966, con un residuo de 11.42 m, el menor valor fue el Pozo IRHS CH-2, con un residuo de 0.11m.

Los valores obtenidos en esta calibración han sido  $|R|=3.51\text{m}$ ,  $\text{SEE}=0.585\text{m}$  y  $\text{RMS}=4.508\text{m}$ . No obstante el valor de RMS no tiene el mismo significado si el cambio de nivel en el dominio del modelo es 10 o 100 m. Por ello se emplea el RMS Normalizado, que es igual al valor de RMS dividido por la máxima diferencia observada en los niveles:

En general se considera que valores de RMS Normalizado por debajo de 10% indican una calibración aceptable, considerándose una calibración buena si se encuentra por debajo del 5% (Fernández 2004). Este estudio muestra que el valor obtenido del RMS Normalizado=2.248%.



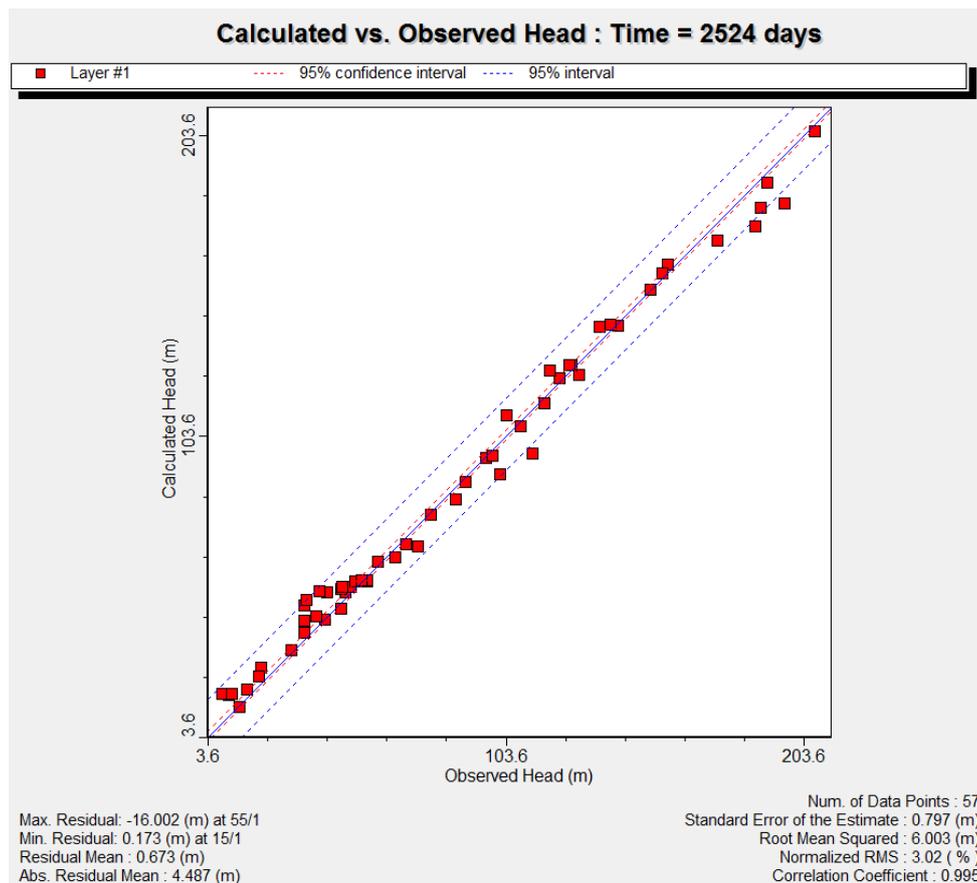
**Figura 28:** Representación y ajuste de datos calculados frente a datos observados en régimen estacionario.

Régimen transitorio:

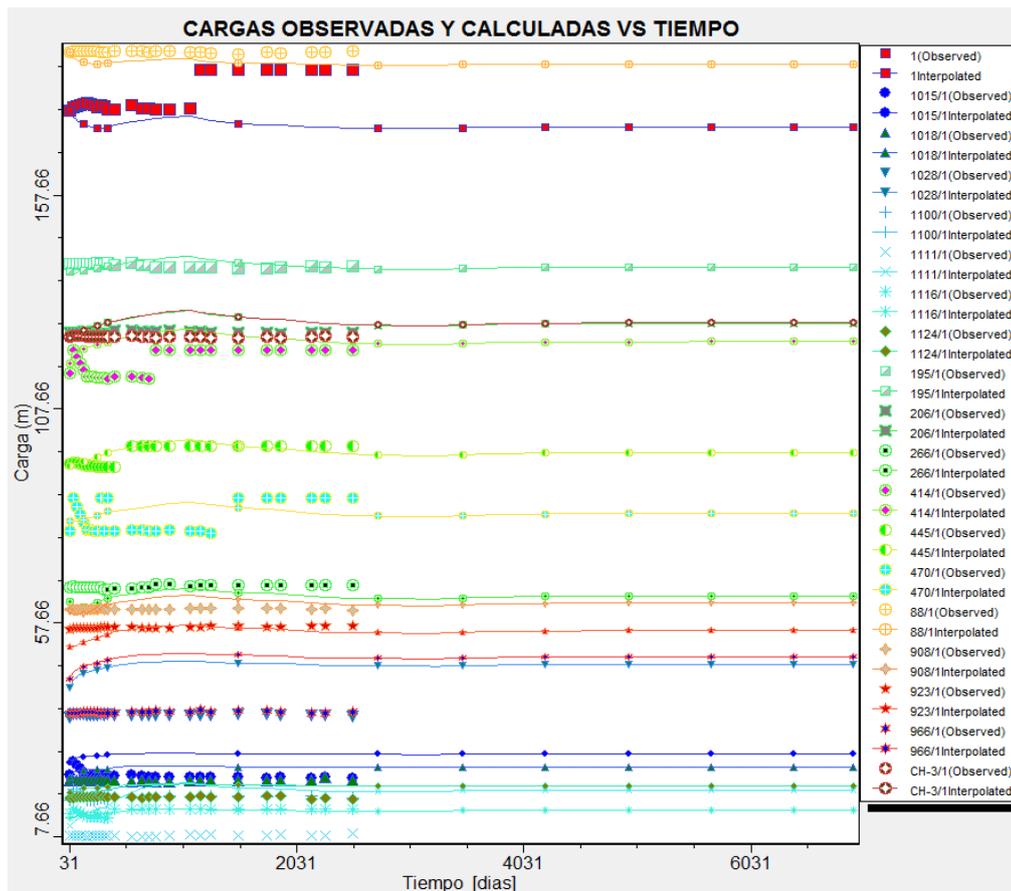
El punto que presentó mayor diferencia entre el valor estimado y el observado, es decir mayor residual, fue el Pozo IRHS 55, con un residuo de 16.00 m, el menor valor fue el Pozo IRHS 15, con un residuo de 0.17 m.

Los valores obtenidos en esta calibración han sido  $|R|=4.48$  m,  $SEE=0.797$  m y  $RMS=6.00$  m. No obstante el valor de RMS no tiene el mismo significado si el cambio de nivel en el dominio del modelo es 10 o 100 m. Por ello se emplea el RMS Normalizado, que es igual al valor de RMS dividido por la máxima diferencia observada en los niveles:

En general se considera que valores de RMS Normalizado por debajo de 10 % indican una calibración aceptable, considerándose una calibración buena si se encuentra por debajo del 5% (Fernández 2004). Este estudio muestra que el valor obtenido ha sido de  $RMS$  Normalizado=3.02%.



**Figura 29:** Representación y ajuste de datos calculados frente a datos observados en régimen transitorio.



**Figura 30:** Representación y ajuste de datos calculados frente a datos observados en régimen transitorio.

### Balance del sistema

Las ecuaciones diferenciales que regulan el flujo de las aguas subterráneas están basadas en la conservación de la masa, de manera que la masa de agua que entra en el sistema debe ser igual a la masa de agua que abandona el sistema. Por tanto un correcto calibrado del modelo de flujo será aquel que dé lugar a un balance de materia sin discrepancias entre las entradas y salidas de agua del sistema.

Régimen estacionario:

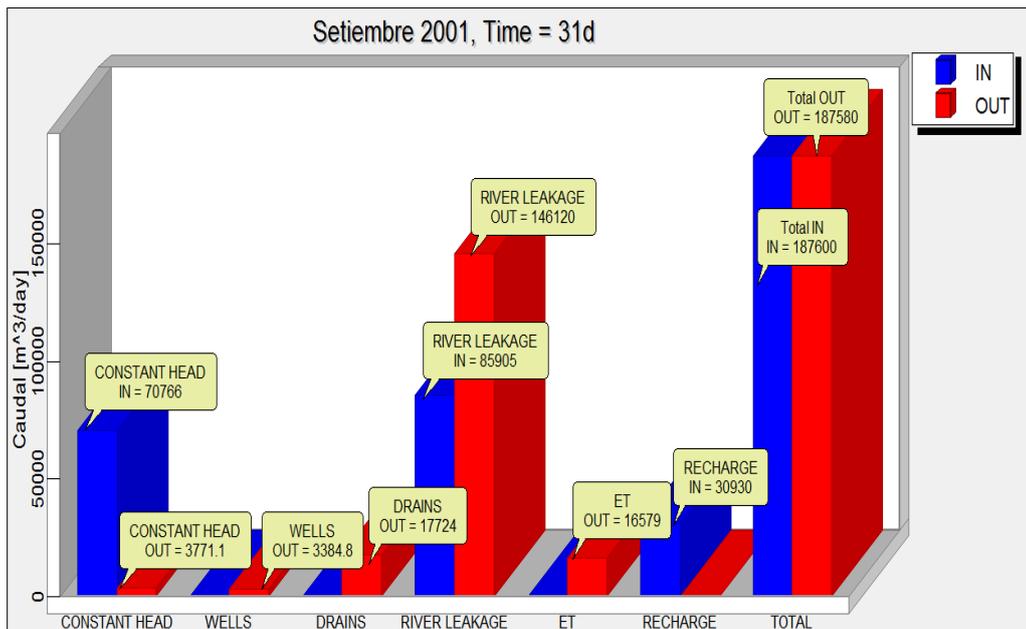
Como puede verse en la Cuadro 34 y en la Figura 31, la principal entrada de agua al sistema se produce por las infiltraciones del río Chao (45.79%), la segunda por las celdas de carga o nivel constante (37.72%) y por la recarga (21,8%). La principal salida de agua del sistema la constituye el río Chao (77.89%), el resto de salidas son a través de las celdas tipo dren (9.45%), celdas de evapotranspiración (8.83%), celdas de nivel constante (2.01%), celdas de pozos de bombeo (1.80%). Los resultados del balance de materia

muestran por tanto una perfecta coincidencia con el planteamiento del modelo conceptual en relación a las principales entradas y salidas del sistema.

La diferencia entre caudales de entrada y salida es de 25.0 m<sup>3</sup>/día, lo que supone un 0.01% de discrepancia. Este reducido valor supone una evaluación cuantitativa positiva de la modelización del flujo realizada.

**Cuadro 34:** Datos de entrada y salida del balance de masa en régimen estacionario

MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA - REGIMEN ESTACIONARIO			
RECARGAS	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.00	0.00	0.00
Recarga subterránea	70766.06	0.82	819.05
Recarga de áreas irrigadas y rio	30930.33	0.36	357.99
Recarga desde rio	85905.02	0.99	994.27
<b>Recarga total</b>	<b>187601.41</b>	<b>2.17</b>	<b>2171.31</b>
DESCARGAS	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.00	0.00	0.00
Flujo subterráneo al océano	3771.08	0.04	43.65
Explotación del acuífero con pozos	3384.76	0.04	39.18
Drenaje	17724.43	0.21	205.14
Perdida por evapotranspiración	16579.25	0.19	191.89
Flujo de acuífero al rio	146116.89	1.69	1691.17
<b>Descarga total</b>	<b>187576.41</b>	<b>2.17</b>	<b>2171.02</b>
<b>Diferencia</b>	<b>25.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.29</b>

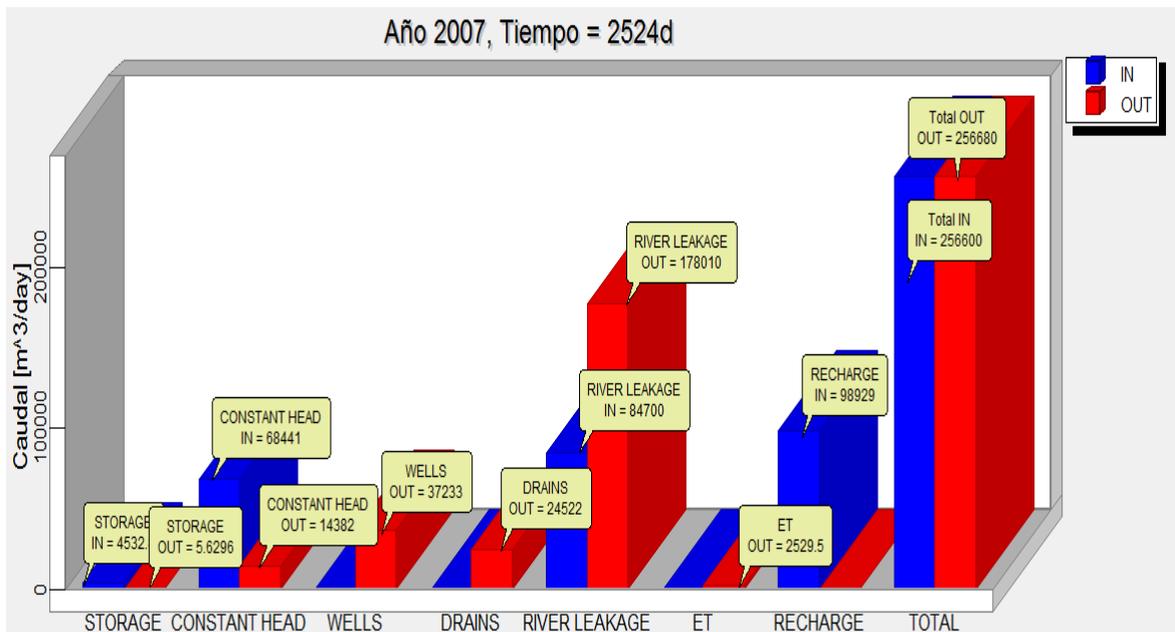


**Figura 31:** Representación del balance de masa en régimen estacionario.

Régimen transitorio:

**Cuadro 35:** Datos de entrada y salida del balance de masa en régimen transitorio

<b>MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA - REGIMEN TRANSITORIO</b>			
<b>RECARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	4532.85	0.05	52.46
Recarga subterránea	68441.30	0.79	792.14
Recarga de áreas irrigadas y rio	98928.95	1.15	1145.01
Recarga desde rio	84699.88	0.98	980.32
<b>Recarga total</b>	<b>256602.98</b>	<b>2.97</b>	<b>2969.94</b>
<b>DESCARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	5.62	0.00	0.07
Flujo subterráneo al océano	14381.72	0.17	166.46
Explotación del acuífero con pozos	37232.65	0.43	430.93
Drenaje	24522.07	0.28	283.82
Perdida por evapotranspiración	2529.54	0.03	29.28
Flujo de acuífero al rio	178007.55	2.06	2060.27
<b>Descarga total</b>	<b>256679.16</b>	<b>2.97</b>	<b>2970.82</b>
<b>Diferencia</b>	<b>-76.18</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.88</b>



**Figura 32:** Representación del balance de masa en régimen transitorio.

Como puede verse en la Cuadro 35 y en la Figura 32, la principal entrada de agua al sistema se produce por recarga desde la superficie de riego (38.55%), infiltraciones del rio Chao (33.01%), celdas de carga o nivel constante (26.67%) y almacenamiento 1.77%).

La principal salida de agua del sistema la constituye el río Chao (69.35%), celdas de pozos de bombeo (14.51%), celdas tipo dren (9.55%), celdas de nivel constante (5.60%), celdas de evapotranspiración (0.99%), cambio en el almacenamiento (0.002%).

Los resultados del balance de materia muestran por tanto una perfecta coincidencia con el planteamiento del modelo conceptual en relación a las principales entradas y salidas del sistema.

La diferencia entre caudales de entrada y salida es de 76.18 m<sup>3</sup>/día, lo que supone un 0.03% de discrepancia. Este reducido valor supone una evaluación cuantitativa positiva de la modelización del flujo realizada.

#### 4.3.4 Escenarios de manejo del acuífero

Una vez calibrado el modelo hidrogeológico matemático del acuífero se procede a aprovechar el mismo para observar lo que sucedería con la sostenibilidad del acuífero, en un futuro inmediato, las variables a tomar son la intensidad de recarga desde los campos agrícolas y los caudales de bombeo. A continuación se plantean cinco (05) escenarios de explotación posibles, los cuales tienen relación con el mejoramiento de riego en el valle viejo y la ampliación de áreas de riego en las partes altas del valle, así como también la explotación del agua subterránea mediante pozos de bombeo, estas acciones tienen como fin disminuir la dotación de agua desde el canal Madre.

**Cuadro 36:** Escala de tiempo en régimen transitorio

Tiempo/ mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2001	31	59	90	120	151	181	212	243	273	304	334	365
2002	396	424	455	485	516	546	577	608	638	669	699	730
2003	761	789	820	850	881	911	942	973	1003	1034	1064	1095
2004	1126	1154	1185	1215	1246	1276	1307	1338	1368	1399	1429	1460
2005	1491	1519	1550	1580	1611	1641	1672	1703	1733	1764	1794	1825
2006	1856	1884	1915	1945	1976	2006	2037	2068	2098	2129	2159	2190
2007	2221	2249	2280	2310	2341	2371	2402	2433	2463	2494	2524	2555
2009	2586	2614	2645	2675	2706	2736	2767	2798	2828	2859	2889	2920
	2951	2979	3010	3040	3071	3101	3132	3163	3193	3224	3254	3285
2011	3316	3344	3375	3405	3436	3466	3497	3528	3558	3589	3619	3650
	3681	3709	3740	3770	3801	3831	3862	3893	3923	3954	3984	4015
2013	4046	4074	4105	4135	4166	4196	4227	4258	4288	4319	4349	4380
	4411	4439	4470	4500	4531	4561	4592	4623	4653	4684	4714	4745
2015	4776	4804	4835	4865	4896	4926	4957	4988	5018	5049	5079	5110
	5141	5169	5200	5230	5261	5291	5322	5353	5383	5414	5444	5475
2017	5506	5534	5565	5595	5626	5656	5687	5718	5748	5779	5809	5840
	5871	5899	5930	5960	5991	6021	6052	6083	6113	6144	6174	6205
2019	6236	6264	6295	6325	6356	6386	6417	6448	6478	6509	6539	6570
	6601	6629	6660	6690	6721	6751	6782	6813	6843	6874	6904	6935

**Cuadro 37:** Escenarios de simulación

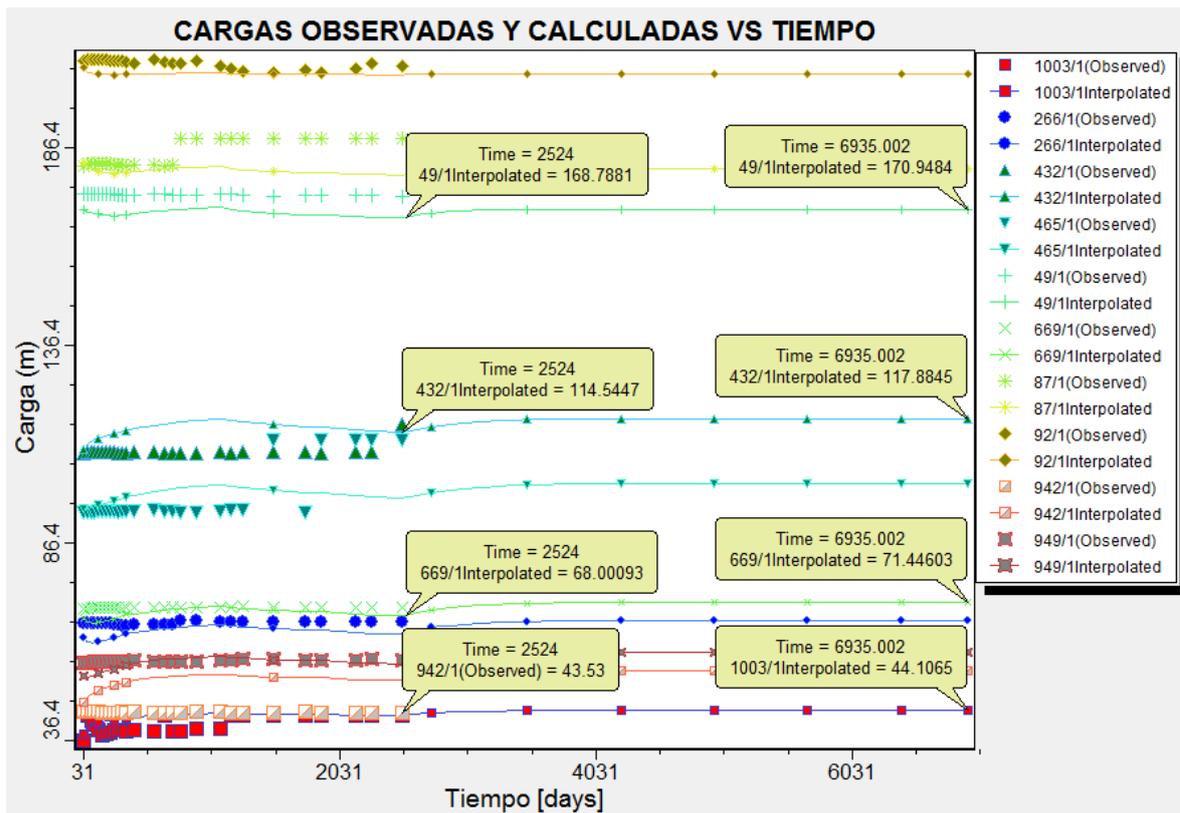
Escenario	Tipo	Usuario	Tipo Riego	Eficiencia/ Operatividad	Consumo de agua en MMC			Total MMC
					Superficial		Subterránea	
					Santa	Chao		
1 Actual	Agrícola A. Mejoramiento	Valle antiguo	gravedad	48.1%	80.87	1.07	13.50	95.44
	Agrícola A. Nueva	Ampliación	presurizado	85%	63.21	-	-	63.21
2 Ampliación	Agrícola A. Mejoramiento	Valle antiguo	gravedad	48.1%	80.87	1.07	13.50	95.44
	Agrícola A. Nueva	Ampliación	presurizado	85%	181.22	-	-	181.22
3 Factibilidad	Agrícola A. Mejoramiento	Valle antiguo	gravedad	55%	47.00	1.07	25.00	73.07
	Agrícola A. Nueva	Ampliación	presurizado	85%	181.22	-	-	181.22
4	Agrícola A. Mejoramiento	Valle antiguo	gravedad	55%	21.96	1.07	50.04	73.07
	Agrícola A. Nueva	Ampliación	presurizado	85%	181.22	-	-	181.22
5	Agrícola A. Mejoramiento	Valle antiguo	gravedad	55%	0	0	73.07	73.07
	Agrícola A. Nueva	Ampliación	presurizado	85%	181.22	-	-	181.22

**a. Escenario 1: Situación actual**

El presente escenario contempla la explotación del acuífero bajo las condiciones de explotación actual del periodo 2016 – 2028, se mantienen las áreas de riego en el valle antiguo con 6672.69 ha, se mantiene también su eficiencia de riego de 48.1%, se incrementó la superficie de riego en el Sector 1 1898.65 ha y Sector 2 con 195 ha, ambos sectores pertenecen a las nuevas áreas de riego presurizado con 85% de eficiencia de riego. La intensidad de recarga en el valle viejo es 742.33 mm/año y 386.05 mm/año área nueva.

**Cuadro 38:** Balance de agua subterránea Escenario 1

<b>MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA - REGIMEN TRANSITORIO</b>			
<b>RECARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.00	0.00	0.00
Recarga subterránea	65172.05	0.75	754.31
Recarga de áreas irrigadas y río	172200.34	1.99	1993.06
Recarga desde río	82686.95	0.96	957.02
<b>Recarga total</b>	<b>320059.34</b>	<b>3.70</b>	<b>3704.39</b>
<b>DESCARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.03	0.00	0.00
Flujo subterráneo al océano	14625.71	0.17	169.28
Explotación del acuífero con pozos	37232.65	0.43	430.93
Drenaje	38068.66	0.44	440.61
Perdida por evapotranspiración	3288.60	0.04	38.06
Flujo de acuífero al río	226839.50	2.63	2625.46
<b>Descarga total</b>	<b>320055.15</b>	<b>3.70</b>	<b>3704.34</b>
<b>Diferencia</b>	<b>4.19</b>	<b>0.00</b>	<b>0.05</b>



**Figura 33:** Hidrograma de pozos Escenario 1.

Los resultados muestran un ligero incremento en el nivel de carga de agua comparados con los pozos de observación, en el Anexo 2 se muestran los abatimientos de la napa freática.

### b. Escenario 2: Ampliación – áreas nuevas

El presente escenario contempla la explotación del acuífero bajo las condiciones de explotación actual del periodo 2016 – 2028, se mantienen las áreas de riego en el valle antiguo con 6672.69 ha, se mantiene también su eficiencia de riego de 48.1%, se incrementó la superficie de riego en las partes altas del valle.

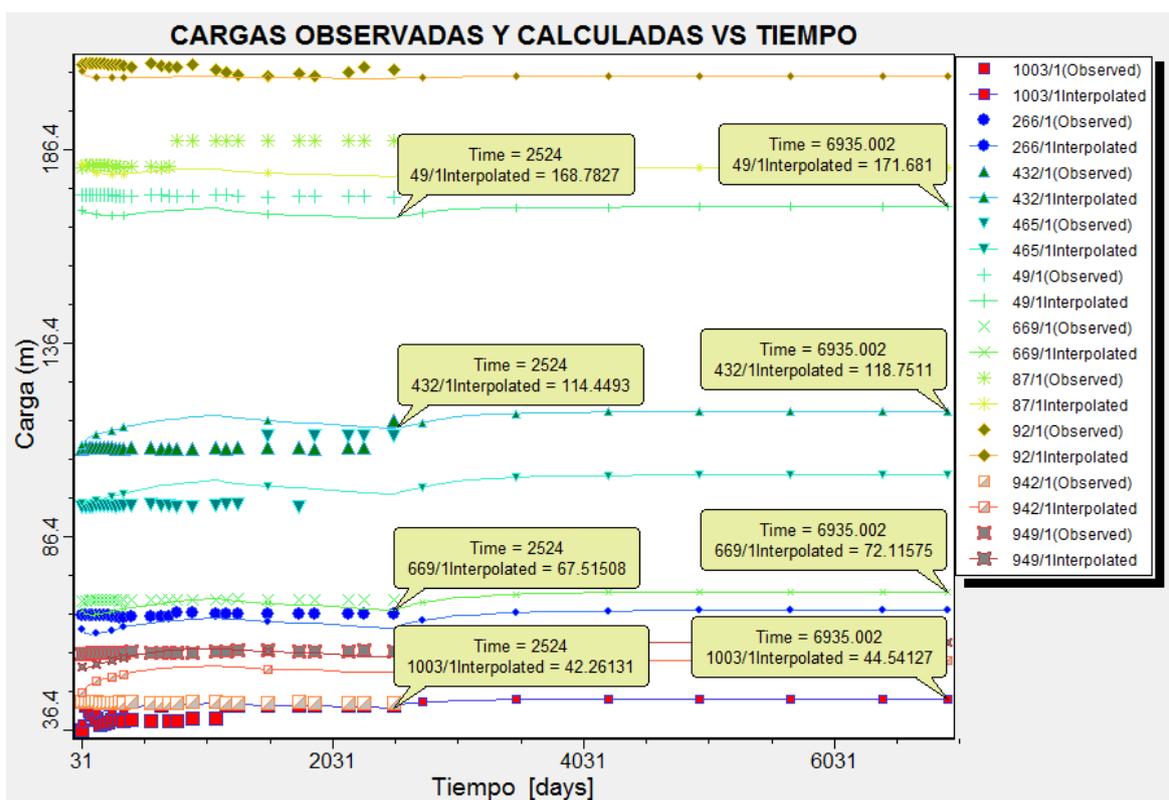
Las tierras en dirección del Santa son el Lote 1, Lote 1B, Lote 1A, Lote 2, Lote 2A, Lote 3A, Lote 3B, Complejo Agroindustrial, La Agonía, Monte Grande, San Carlos Alto.

Las tierras en dirección a Virú son Lote 7I, Lote 7II, Lote 7III, Lote 7IV, todos estos lotes suman un área bruta de 16034.74 ha y 14353.244 de área neta, todos los lotes pertenecen a las nuevas áreas de riego presurizado con 85% de eficiencia de riego.

La intensidad de recarga en el valle viejo des de 742.33 mm/año, la recarga en las áreas nuevas de riego es de 189.38 mm/año y un bombeo mediante pozos de 13.5 Hm<sup>3</sup>.

**Cuadro 39:** Balance de agua subterránea Escenario 2

<b>MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA - REGIMEN TRANSITORIO</b>			
<b>RECARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.00	0.00	0.00
Recarga subterránea	64552.47	0.75	747.14
Recarga de áreas irrigadas y rio	220626.13	2.55	2553.54
Recarga desde rio	82435.72	0.95	954.12
<b>Recarga total</b>	<b>367614.32</b>	<b>4.25</b>	<b>4254.80</b>
<b>DESCARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.03	0.00	0.00
Flujo subterráneo al océano	14665.50	0.17	169.74
Explotación del acuífero con pozos	37232.65	0.43	430.93
Drenaje	44621.99	0.52	516.46
Perdida por evapotranspiración	3469.78	0.04	40.16
Flujo de acuífero al rio	267620.66	3.10	3097.46
<b>Descarga total</b>	<b>367610.61</b>	<b>4.25</b>	<b>4254.75</b>
<b>Diferencia</b>	<b>3.71</b>	<b>0.00</b>	<b>0.04</b>



**Figura 34:** Hidrograma de pozos Escenario 2.

Los resultados muestran un incremento en el nivel de carga de agua comparados con los pozos de observación, en el Anexo 2 se muestran los abatimientos de la napa freática.

### c. Escenario 3: Factibilidad

El presente escenario contempla la explotación del acuífero bajo las condiciones de explotación actual del periodo 2016 – 2028, se mantienen las áreas de riego en el valle antiguo con 6672.69 ha, se mantiene también su eficiencia de riego de 55 %, se incrementó la superficie de riego en las partes altas del valle.

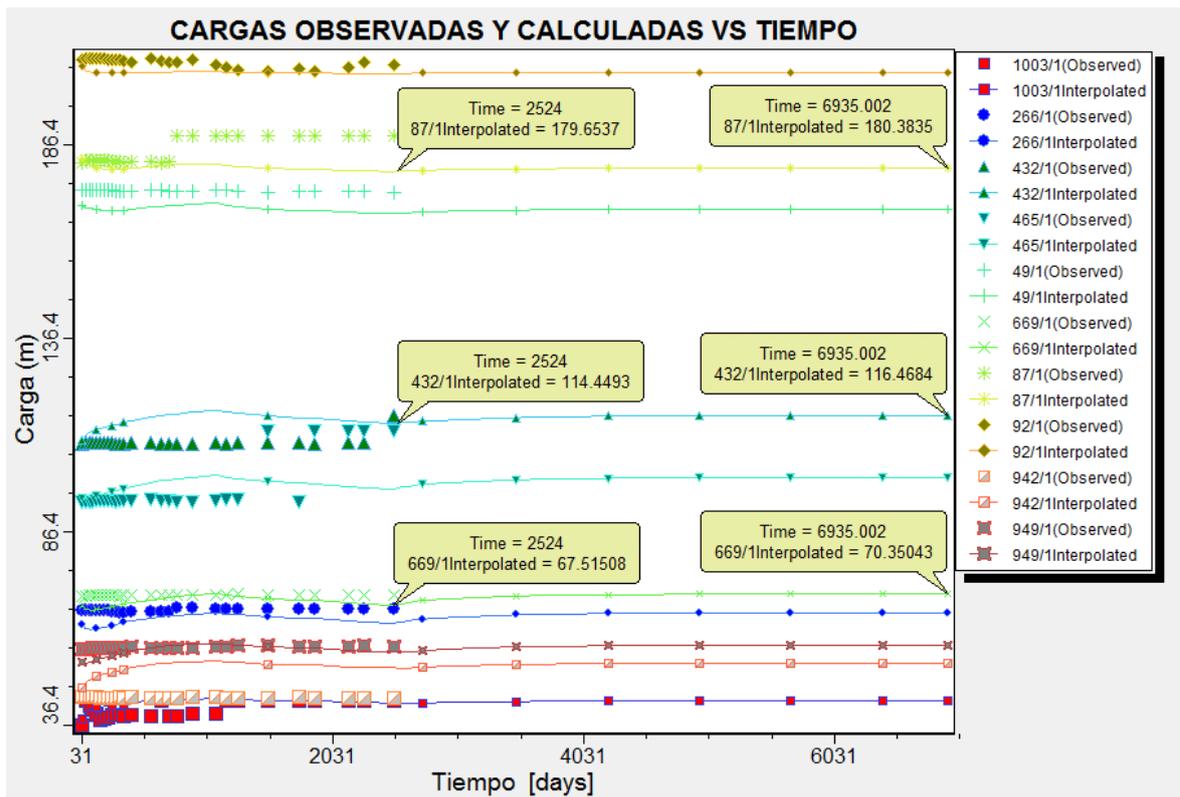
Las tierras en dirección del Santa son el Lote1, Lote 1B, Lote 1A, Lote 2, Lote 2A, Lote 3A, Lote 3B, Complejo Agroindustrial, La Agonía, Monte Grande, San Carlos Alto.

Las tierras en dirección a Virú son Lote 7I, Lote 7II, Lote 7III, Lote 7IV, todos estos lotes suman un área bruta de 16034.74 ha y 14353.244 ha de área neta, todos los lotes pertenecen a las nuevas áreas de riego presurizado con 85% de eficiencia de riego.

La intensidad de recarga en el valle viejo des de 492.77 mm/año, y la recarga en las áreas nuevas de riego es de 189.38 mm/año y un bombeo mediante pozos de 25 Hm<sup>3</sup>.

**Cuadro 40:** Balance de agua subterránea Escenario 3

<b>MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA - REGIMEN TRANSITORIO</b>			
<b>RECARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.01	0.00	0.00
Recarga subterránea	67211.98	0.78	777.92
Recarga de áreas irrigadas y río	171433.91	1.98	1984.19
Recarga desde río	84415.16	0.98	977.03
<b>Recarga total</b>	<b>323061.06</b>	<b>3.74</b>	<b>3739.13</b>
<b>DESCARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.06	0.00	0.00
Flujo subterráneo al océano	14460.36	0.17	167.37
Explotación del acuífero con pozos	68679.40	0.79	794.90
Drenaje	28148.10	0.33	325.79
Perdida por evapotranspiración	3111.79	0.04	36.02
Flujo de acuífero al río	208654.02	2.41	2414.98
<b>Descarga total</b>	<b>323053.73</b>	<b>3.74</b>	<b>3739.05</b>
<b>Diferencia</b>	<b>7.33</b>	<b>0.00</b>	<b>0.08</b>



**Figura 35:** Hidrograma de pozos Escenario 3

Los resultados muestran un ligero incremento en el nivel de carga de agua comparados con los pozos de observación, en el Anexo 2 se muestran los abatimientos de la napa freática.

**d. Escenario 4: Incremento de caudal de bombeo a 50.0 Hm<sup>3</sup>**

El presente escenario contempla la explotación del acuífero bajo las condiciones de explotación actual del periodo 2016 – 2028, se mantienen las áreas de riego en el valle antiguo con 6672.69 ha, se mantiene también su eficiencia de riego de 55 %, se incrementó la superficie de riego en las partes altas del valle.

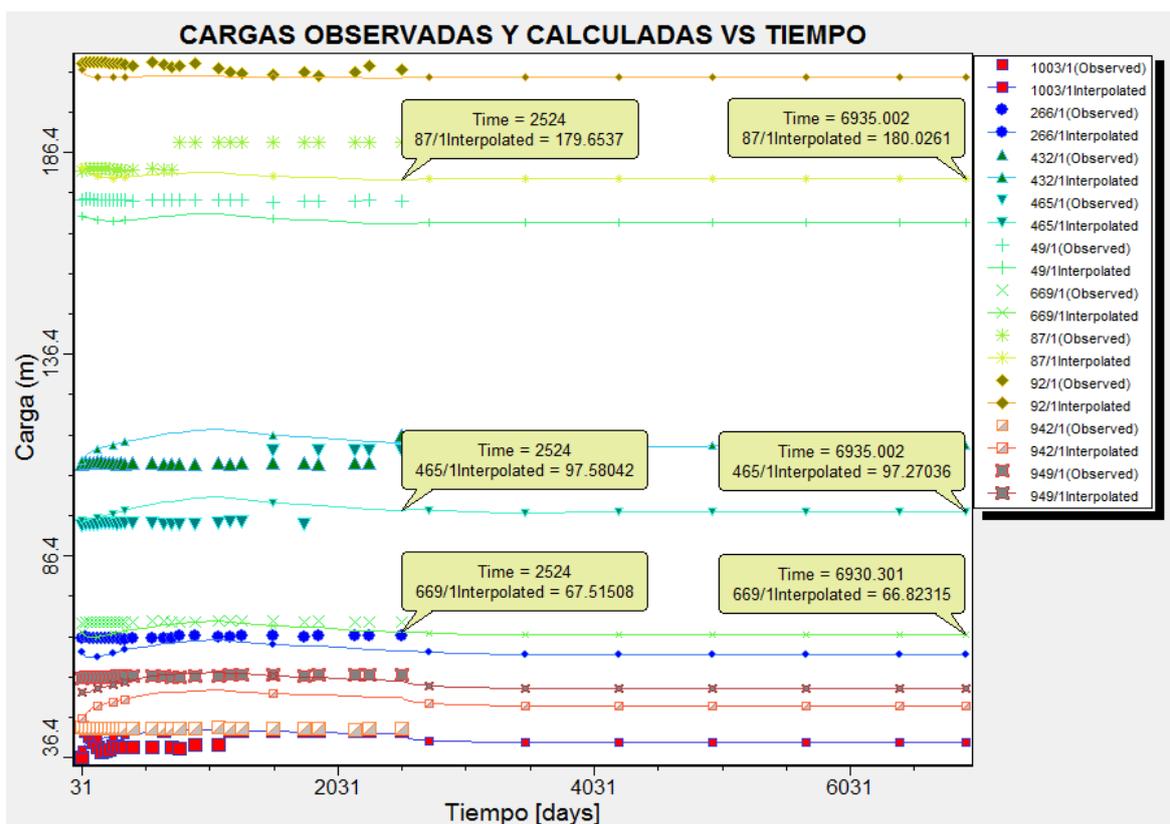
Las tierras en dirección del Santa son el Lote 1, Lote 1B, Lote 1A, Lote 2, Lote 2A, Lote 3A, Lote 3B, Complejo Agroindustrial, La Agonía, Monte Grande, San Carlos Alto.

Las tierras en dirección a Virú son Lote 7I, Lote 7II, Lote 7III, Lote 7IV, todos estos lotes suman un área bruta de 16034.74 ha y 14353.244 de área neta, todos los lotes pertenecen a las nuevas áreas de riego presurizado con 85% de eficiencia de riego.

La intensidad de recarga en el valle viejo des de 492.77 mm/año, y la recarga en las áreas nuevas de riego es de 189.38 mm/año y un bombeo mediante pozos de 50 Hm<sup>3</sup>.

**Cuadro 41:** Balance de agua subterránea Escenario 4

MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA - REGIMEN TRANSITORIO			
<b>RECARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.00	0.00	0.00
Recarga subterránea	67511.74	0.78	781.39
Recarga de áreas irrigadas y rio	171433.91	1.98	1984.19
Recarga desde rio	87285.45	1.01	1010.25
<b>Recarga total</b>	<b>326231.10</b>	<b>3.78</b>	<b>3775.82</b>
<b>DESCARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	5.50	0.00	0.06
Flujo subterráneo al océano	14447.72	0.17	167.22
Explotación del acuífero con pozos	137103.50	1.59	1586.85
Drenaje	17634.61	0.20	204.10
Perdida por evapotranspiración	2333.14	0.03	27.00
Flujo de acuífero al rio	154707.44	1.79	1790.60
<b>Descarga total</b>	<b>326231.90</b>	<b>3.78</b>	<b>3775.83</b>
<b>Diferencia</b>	<b>-0.80</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.01</b>



**Figura 36:** Hidrograma de pozos Escenario 4.

Los resultados muestran una disminución en el nivel de carga de agua comparados con los pozos de observación, en el Anexo 2 se muestran los abatimientos de la napa freática.

### e. Escenario 5: Solo agua subterránea

El presente escenario contempla la explotación del acuífero bajo las condiciones de explotación actual del periodo 2016 – 2028, se mantienen las áreas de riego en el valle antiguo con 6672.69 ha, se mantiene también su eficiencia de riego de 55 %, se incrementó la superficie de riego en las partes altas del valle.

Las tierras en dirección del Santa son el Lote1, Lote 1B, Lote 1A, Lote 2, Lote 2A, Lote 3A, Lote 3B, Complejo Agroindustrial, La Agonía, Monte Grande, San Carlos Alto.

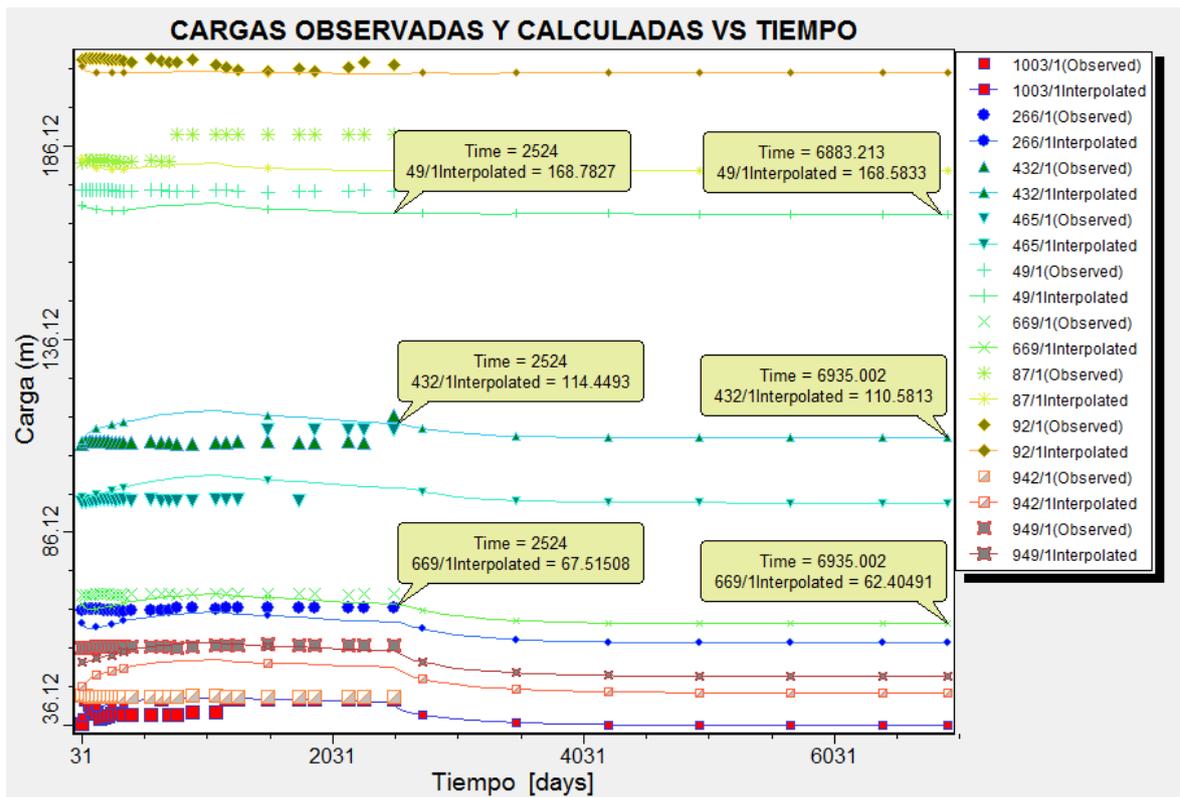
Las tierras en dirección a Virú son Lote 7I, Lote 7II, Lote 7III, Lote 7IV, todos estos lotes suman un área bruta de 16034.74 ha y 14353.244 de área neta, todos los lotes pertenecen a las nuevas áreas de riego presurizado con 85% de eficiencia de riego.

La intensidad de recarga en el valle viejo des de 492.77 mm/año, y la recarga en las áreas nuevas de riego es de 189.38 mm/año y un bombeo mediante pozos de 73.07 Hm<sup>3</sup>.

**Cuadro 42:** Balance de agua subterránea Escenario 5

<b>MODELO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA - REGIMEN TRANSITORIO</b>			
<b>RECARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	23.47	0.00	0.27
Recarga subterránea	67794.16	0.78	784.65
Recarga de áreas irrigadas y rio	171433.91	1.98	1984.19
Recarga desde rio	91865.97	1.06	1063.26
<b>Recarga total</b>	<b>331117.50</b>	<b>3.83</b>	<b>3832.38</b>
<b>DESCARGAS</b>	Q(m <sup>3</sup> /d)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Q(l/s)
Almacenamiento	0.00	0.00	0.00
Flujo subterráneo al océano	14428.59	0.17	167.00
Explotación del acuífero con pozos	200207.00	2.32	2317.21
Drenaje	10757.55	0.12	124.51
Perdida por evapotranspiración	1732.51	0.02	20.05
Flujo de acuífero al rio	103995.39	1.20	1203.65
<b>Descarga total</b>	<b>331121.04</b>	<b>3.83</b>	<b>3832.42</b>
<b>Diferencia</b>	<b>-3.54</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.04</b>

Los resultados muestran una disminución significativa en el nivel de carga de agua comparados con los pozos de observación, en el Anexo 2 se muestran los abatimientos de la napa freática.



**Figura 37:** Hidrograma de pozos Escenario 5.

#### 4.4 SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Este subcapítulo se desarrollará primero con la simulación mensual del escenario actual mediante la introducción de la información de la serie de aportaciones mensuales históricas y la demanda actual, luego con la simulación del escenario futuro con la introducción de la demanda futura y la información de la serie de aportaciones mensuales sintéticas, a continuación con la realización de un análisis de implementación de infraestructura de regulación y el incremento de explotación de aguas subterráneas.

Los escenarios de simulación en el modelo de gestión fueron:

##### 4.4.1 Escenario 1

Es la simulación del escenario actual simulara con las aportaciones históricas desde el año 2011 hasta el 2015, en donde el Proyecto Chavimochic tiene concluida las etapas I y II, que comprenden desde la margen derecha del rio santa (Tanguche – Guadalupito) hasta el valle de Moche, se incluye el embalse de compensación horaria Palito Redondo con 9.5 Hm<sup>3</sup> al año. La irrigación en la margen izquierda comprende al Proyecto Chinecas la situación actual de este proyecto comprende las Bocatomas la Víbora que irriga el valle

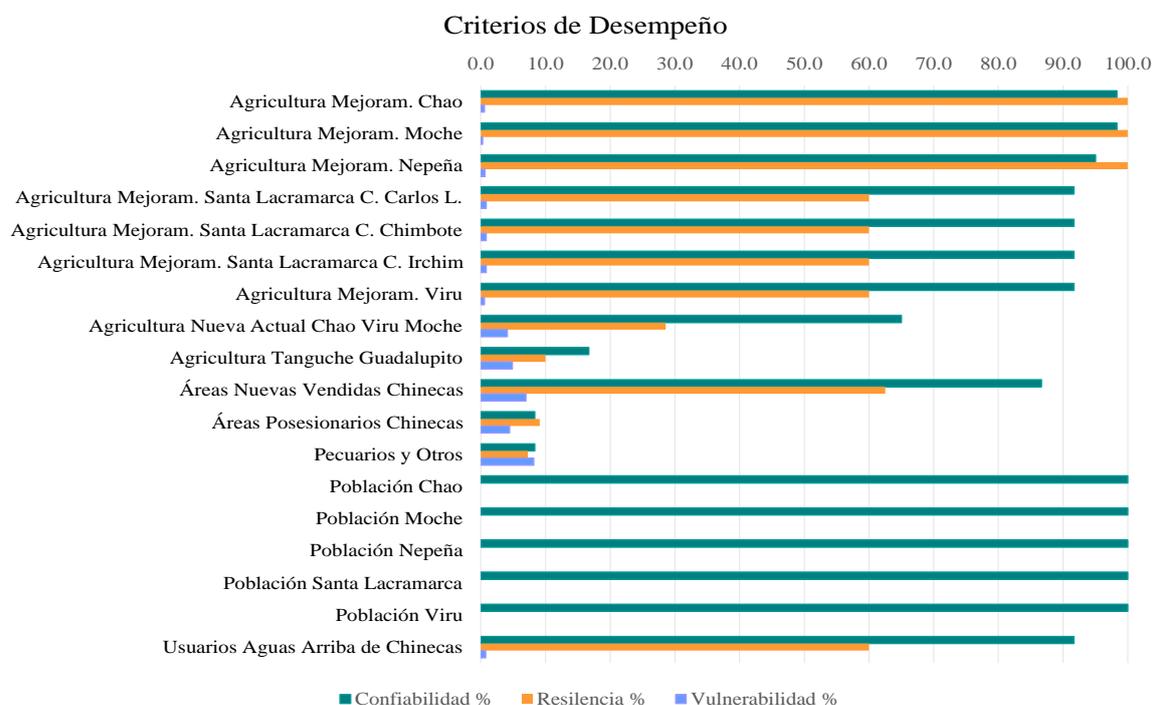
viejo del Santa y abastece a la población de Chimbote, la segunda bocatoma es la Huaca que irriga los valles de Santa y Lacramarca además abastece de agua a la población de Nuevo Chimbote, el canal Irchim que inicia desde la Bocatoma La Huaca continua con el canal principal llegando hasta la margen izquierda del río Nepeña km 76 al 88 actualmente en construcción.

**Cuadro 43:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal

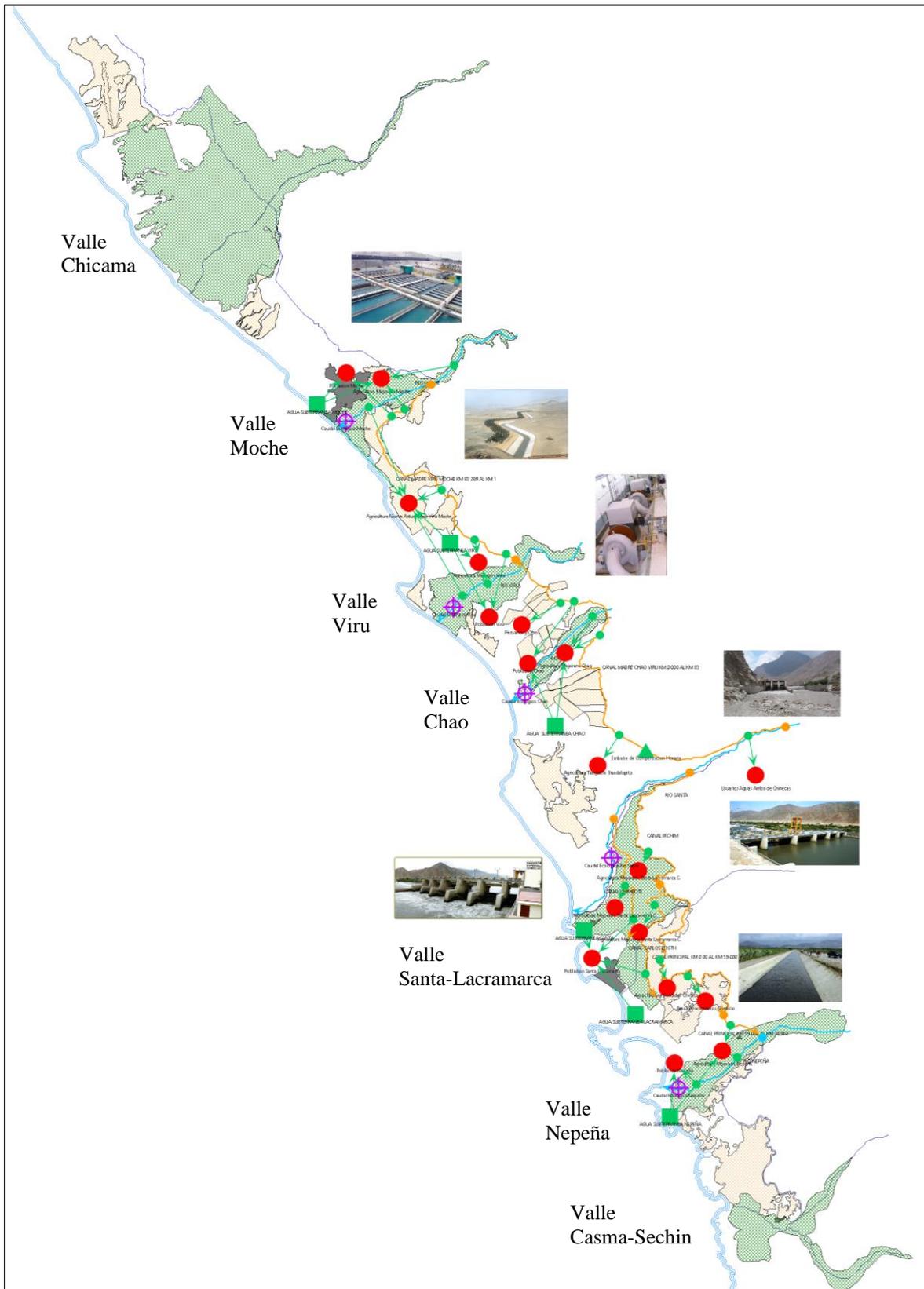
N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Mejoram. Chao	60	1	98.33	1	100.00	0.52	0.55	95.44
2	Agricultura Mejoram. Moche	60	1	98.33	1	100.00	0.38	0.30	128.98
3	Agricultura Mejoram. Nepeña	60	3	95.00	3	100.00	0.95	0.64	49.36
4	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Carlos L.	60	5	91.67	3	60.00	6.47	0.83	155.85
5	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	60	5	91.67	3	60.00	9.43	0.83	227.04
6	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	60	5	91.67	3	60.00	10.10	0.83	243.03
7	Agricultura Mejoram. Viru	60	5	91.67	3	60.00	4.53	0.55	164.34
8	Agricultura Nueva Actual Chao Viru Moche	60	21	65.00	6	28.57	170.86	4.09	198.95
9	Agricultura Tanguche Guadalupito	60	50	16.67	5	10.00	75.27	4.88	30.83
10	Áreas Nuevas Vendidas Chinecas	60	8	86.67	5	62.50	36.22	6.96	65.06
11	Áreas Posesionarios Chinecas	60	55	8.33	5	9.09	625.52	4.44	256.03
12	Pecuarios y Otros	60	55	8.33	4	7.27	211.84	8.16	47.21
13	Población Chao	60	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	0.37
14	Población Moche	60	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	56.77
15	Población Nepeña	60	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.27
16	Población Santa Lacramarca	60	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	60.86
17	Población Viru	60	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	0.59
18	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	60	5	91.67	3	60.00	2.55	0.75	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda

N/A: No Aplicable



**Figura 38:** Criterio de desempeño condición hidrológica normal.



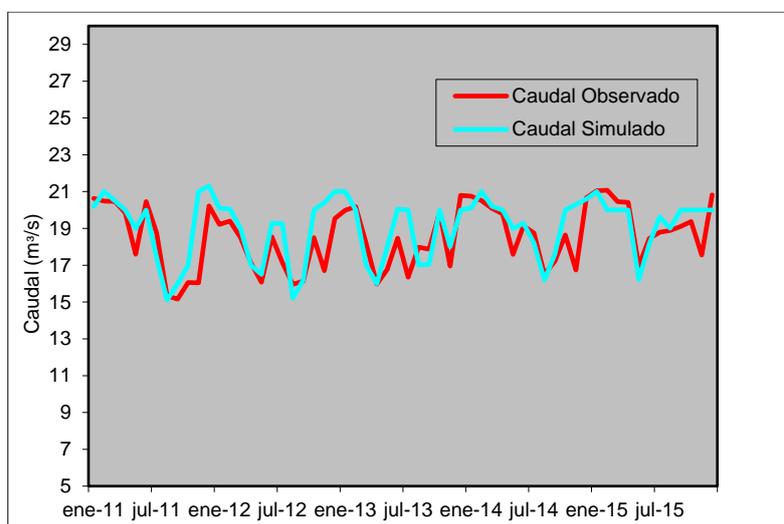
**Figura 39:** Esquema del área de estudio modelo WEAP, escenario 1.

### a. Calibración del modelo

A continuación se realiza la calibración del canal Irchim que se ubica a la salida del desarenador la Huaca, este canal de derivación lleva las aguas del río Santa hacia los valles de Santa, Lacramarca, Nepeña y Casma.

**Cuadro 44:** Estadísticas de correspondencia entre el caudal observado y caudal simulado  
Canal Irchim – salida de desarenador

Criterio de Eficiencia %	
Nash (Q)	0.360
Bias	2.743
RMSE	1.346

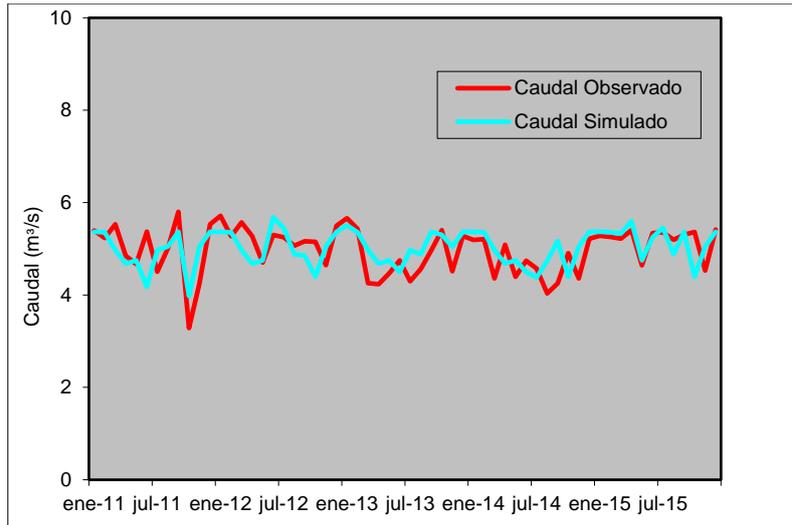


**Figura 40:** Caudal observado Caudal simulado Canal Irchim – salida de desarenador

A continuación se realiza la calibración del canal Carlos Leight que es una derivación del canal Irchim a la altura de la Estación de control 40+100.

**Cuadro 45:** Estadísticas de correspondencia entre el caudal observado y caudal simulado  
Canal Carlos Leight

Criterio de Eficiencia %	
Nash (Q)	0.223
Bias	1.010
RMSE	0.437

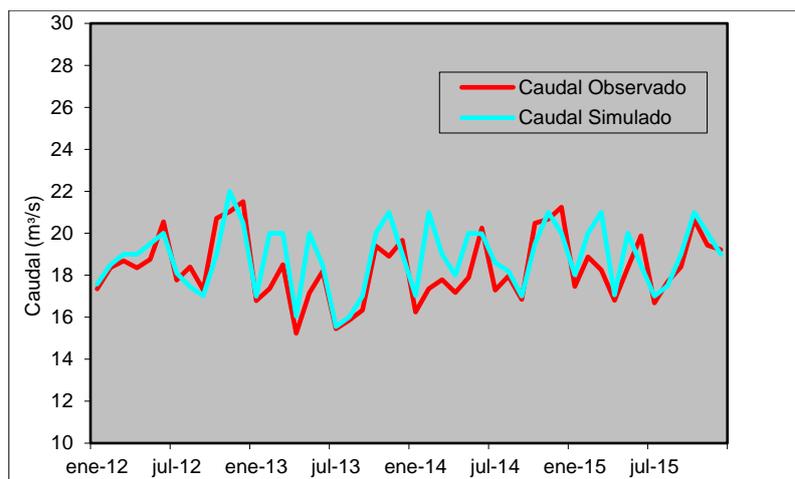


**Figura 41:** Caudal observado Caudal simulado canal Carlos Leight.

A continuación se realiza la calibración del canal Madre a la salida del embalse de compensación horaria Palito Redondo.

**Cuadro 46:** Estadísticas de correspondencia entre el caudal observado y caudal simulado Canal Madre, salida de embalse de compensación horaria

Criterio de Eficiencia %	
Nash (Q)	0.386
Bias	2.784
RMSE	1.216



**Figura 42:** Caudal observado Caudal simulado Canal Madre, salida de embalse de compensación horaria

#### 4.4.2 Escenario 2

En este escenario futuro desde el año 2016 al 2065, la oferta se simula con aportaciones sintéticas de los ríos Casma-Sechin, Nepeña, Santa, Chao, Virú, Moche, Chicama y la explotación de aguas subterráneas de 90 Hm<sup>3</sup> en Chao, Virú, Moche y 185.3 Hm<sup>3</sup> en Chicama según lo propuesto en el estudio de Factibilidad en Chavimochic, la explotación de aguas subterráneas de 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chinescas en los Valles de Santa - Lacramarca, Nepeña y Casma.

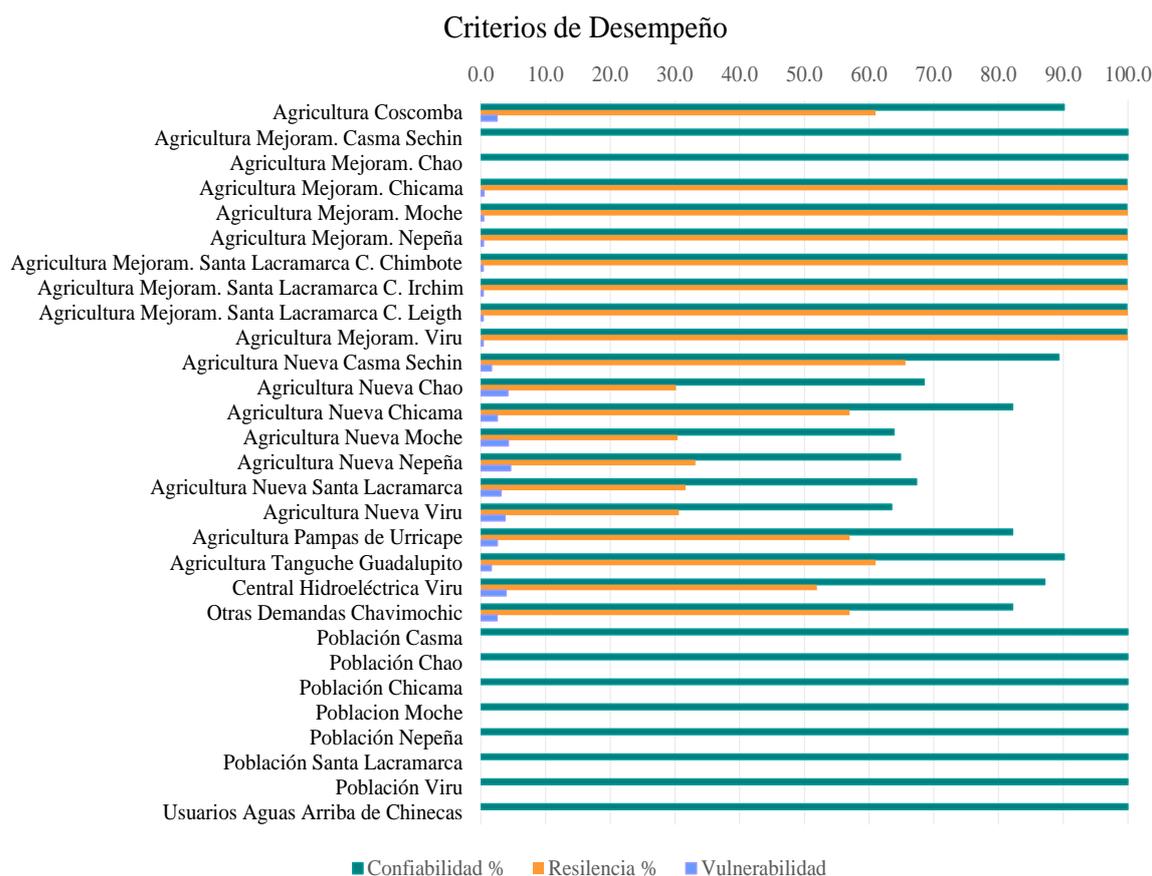
Las demandas futuras de Chavimochic incluyen el mejoramiento y ampliación de las áreas de riego en Chao, Virú, Moche, Chicama y la conclusión de las obras de la tercera etapa en donde se irrigara hasta las Pampas de Urricape al norte de Chicama, además la demanda poblacional futura y el aumento de caudal en la central hidroeléctrica de Virú, las demandas futuras en Chinescas comprenden el mejoramiento en los valles Santa-Lacramarca, Nepeña y Casma, y la ampliación de las áreas de riego en los intervalles de estos mismos, a estos agregarle la demanda poblacional futura, todo es posible con la conclusión en la construcción del canal principal hasta el río Sechin.

**Cuadro 47:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm3)	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm3/año)
1	Agricultura Coscomba	600	59	90.17	36	61.02	167.75	2.51	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	1	99.83	1	100	4.44	0.49	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	1	99.83	1	100	0.37	0.45	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	1	99.83	1	100	0.55	0.40	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	1	99.83	1	100	0.50	0.34	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	1	99.83	1	100	0.54	0.34	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	1	99.83	1	100	0.35	0.34	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	1	99.83	1	100	0.38	0.35	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	64	89.33	42	65.63	146.63	1.66	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	189	68.50	57	30.16	1593.98	4.16	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	107	82.17	61	57.01	720.78	2.52	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	217	63.83	66	30.41	1369.27	4.25	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	211	64.83	70	33.18	442.17	4.61	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	196	67.33	62	31.63	1298.06	3.11	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	219	63.50	67	30.59	1539.44	3.74	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	107	82.17	61	57.01	398.59	2.52	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	59	90.17	36	61.02	28.94	1.59	30.83
20	Central Hidroeléctrica Viru	600	77	87.17	40	51.95	168.71	3.88	56.42
21	Otras Demandas Chavimochic	600	107	82.17	61	57.01	89.71	2.50	33.52
22	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
23	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
24	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
25	Poblacion Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
26	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
27	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
28	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
29	Usuarios Aguas Arriba de Chinescas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda

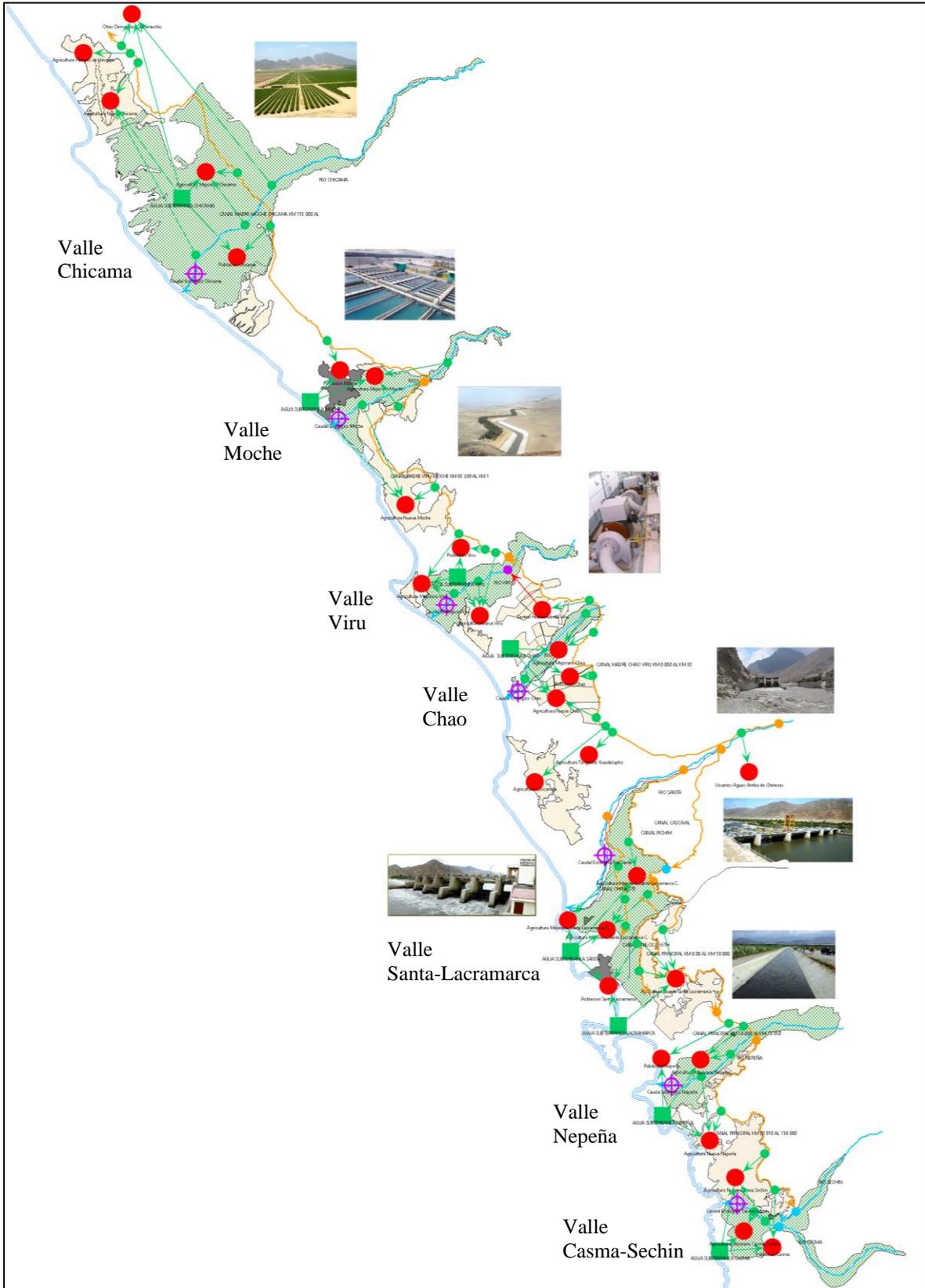
N/A: No Aplicable



**Figura 43:** Criterios de desempeño condición hidrológica normal.

#### 4.4.3 Escenario 3

En este escenario futuro desde el año 2016 al 2065, la oferta se simulará con aportaciones sintéticas de los ríos Casma-Sechin, Nepeña, Santa, Chao, Virú, Moche, Chicama y aumentará la explotación de aguas subterráneas de 90 Hm<sup>3</sup> a 225 Hm<sup>3</sup> en Chao, Virú, Moche y de 185.3 Hm<sup>3</sup> a 226.74 Hm<sup>3</sup> en Chicama, la explotación de aguas subterráneas de 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chinecas se mantendrá en los Valles de Santa - Lacramarca, Nepeña y Casma. Las demandas futuras de Chavimochic incluyen el mejoramiento y ampliación de las áreas de riego en Chao, Virú, Moche, Chicama y la conclusión de las obras de la tercera etapa en donde se irrigara hasta las Pampas de Urricape al norte de Chicama, además la demanda poblacional futura y el aumento de caudal en la central hidroeléctrica de Virú, las demandas futuras en Chinecas comprenden el mejoramiento en los valles Santa-Lacramarca, Nepeña y Casma, y la ampliación de las áreas de riego en los intervalles de estos mismos, a estos agregarle la demanda poblacional futura, todo es posible con la conclusión en la construcción del canal principal hasta el río Sechin.



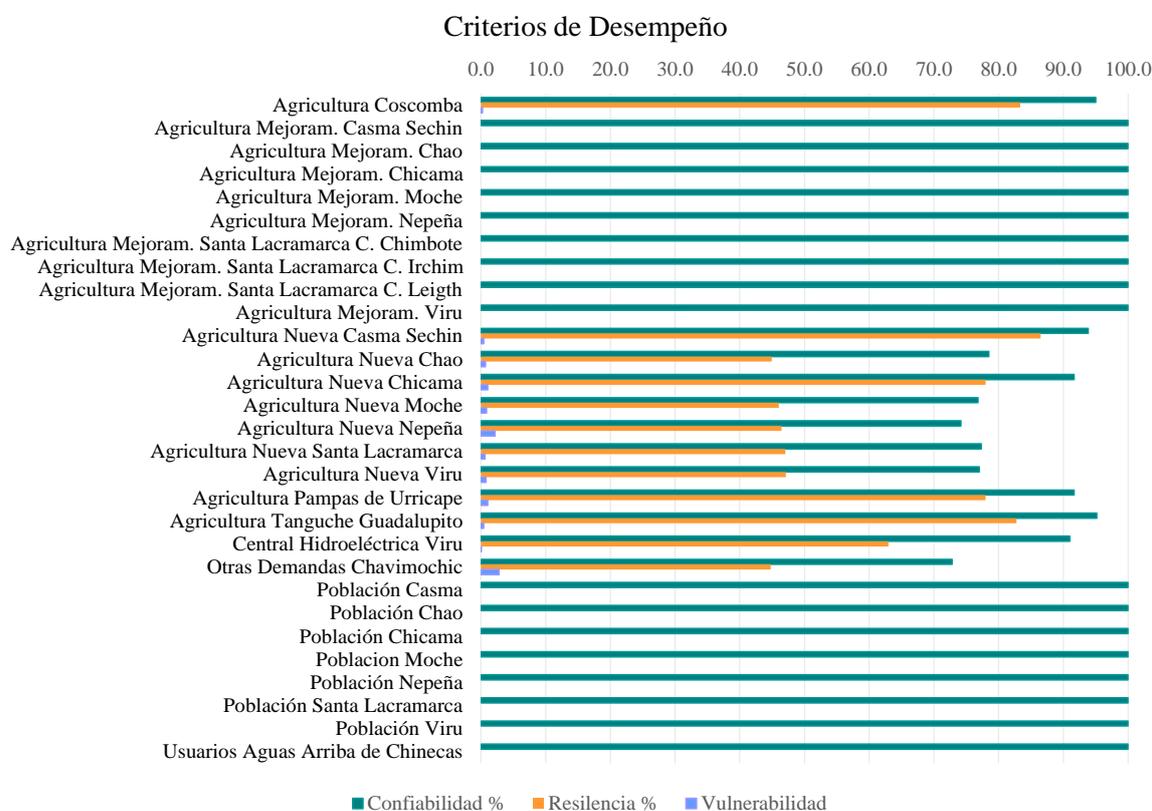
**Figura 44:** Esquema del área de estudio modelo WEAP, escenario 2 y 3.

**Cuadro 48:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal

Nº	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm³)	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm³/año)
1	Agricultura Coscomba	600	30	95.00	25	83.33	7.87	0.23	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	37	93.83	32	86.49	22.33	0.44	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	129	78.50	58	44.96	188.02	0.72	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	50	91.67	39	78.00	141.52	1.06	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	139	76.83	64	46.04	181.63	0.88	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	155	74.17	72	46.45	154.09	2.19	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	136	77.33	64	47.06	183.88	0.63	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	138	77.00	65	47.10	208.32	0.80	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	50	91.67	39	78.00	77.99	1.06	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	29	95.17	24	82.76	4.03	0.45	30.83
20	Central Hidroeléctrica Viru	600	54	91.00	34	62.96	1.98	0.07	56.42
21	Otras Demandas Chavimochic	600	163	72.83	73	44.79	152.37	2.79	33.52
22	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
23	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
24	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
25	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
26	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
27	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
28	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
29	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda

N/A: No Aplicable



**Figura 45:** Criterios de desempeño condición hidrológica normal.

#### 4.4.4 Análisis de implementación de infraestructura de regulación

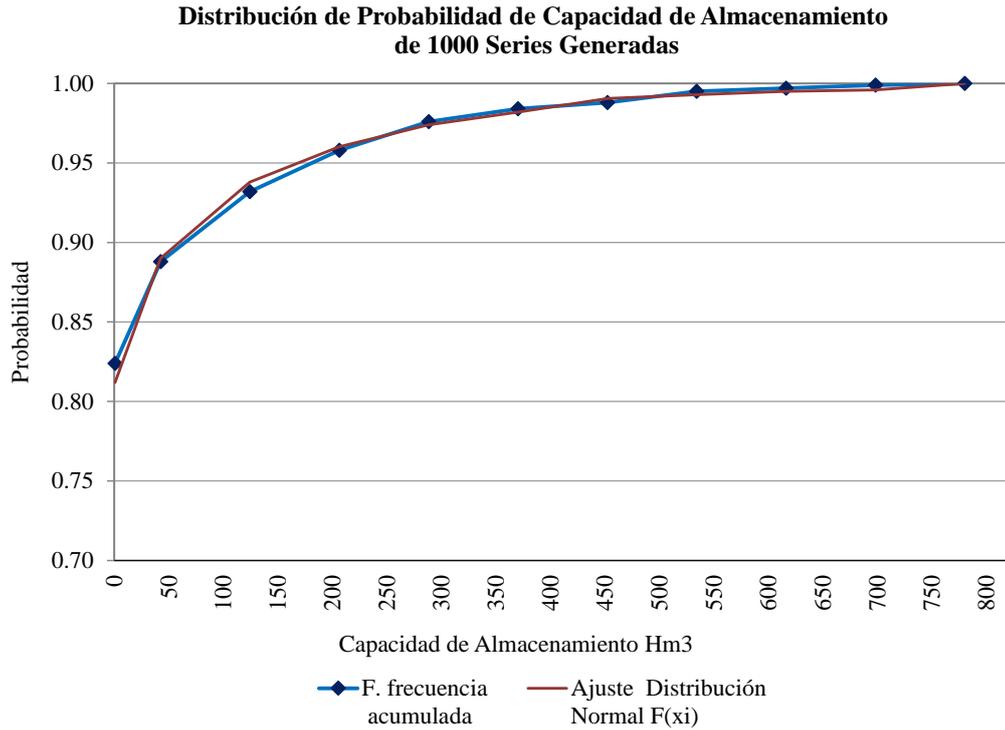
El problema de determinar el volumen de embalse necesario para satisfacer ciertas demandas se resuelve adoptando un valor en el criterio de desempeño de la confiabilidad. Fijado dicho valor, se calcula el volumen mínimo necesario para satisfacer la demanda de cálculo a partir de las aportaciones históricas o sintéticas.

En esta investigación se intentará dimensionar dos embalses virtuales en el sistema de recursos hídricos tanto para el Proyecto Chavimochic como para el proyecto Chincas, de tal manera que la confiabilidad de las demandas futuras sean cumplidas.

**Cuadro 49:** Ajuste de los valores de capacidad de almacenamiento a una función de probabilidad normal

N°	LC Inferior	LC Superior	Capacidad de Almacenamiento	Clase	Frecuencia	F. frecuencia Relativa	F. frecuencia acumulada	Distribución Normal F(xi)
1	0.00	1.54	0.77	1.54	824	0.824	0.824	0.812
2	1.54	83.54	42.54	83.54	64	0.064	0.888	0.890
3	83.54	165.54	124.54	165.54	44	0.044	0.932	0.938
4	165.54	247.54	206.54	247.54	26	0.026	0.958	0.960
5	247.54	329.54	288.54	329.54	18	0.018	0.976	0.974
6	329.54	411.54	370.54	411.54	8	0.008	0.984	0.982
7	411.54	493.54	452.54	493.54	4	0.004	0.988	0.991
8	493.54	575.54	534.54	575.54	7	0.007	0.995	0.993
9	575.54	657.54	616.54	657.54	2	0.002	0.997	0.995
10	657.54	739.54	698.54	739.54	2	0.002	0.999	0.996
11	739.54	821.54	780.54	821.54	1	0.001	1.000	1.000
12	821.54			y mayor...	0	1.00		

El déficit de agua para todos los ríos sin considerar el Santa es de 2190.70 Hm<sup>3</sup> anuales, este déficit representa un 50% de la media de aportaciones anuales de la serie histórica del río Santa, con la cual se calculó 1000 valores de capacidad de almacenamiento, donde 824 valores son igual a cero y 176 valores diferentes de cero. Con un valor medio de los valores no nulos de capacidad de almacenamiento que corresponde a un valor aproximadamente igual a 210 Hm<sup>3</sup> (Probabilidad de no excedencia del 96.1%) se procedió a simular el sistema de recursos hídricos de los Proyectos Chavimochic y Chincas en el escenario futuro, con las aportaciones sintéticas de los siete ríos. Aparentemente esta capacidad sería suficiente para cumplir las garantías de las demandas futuras, sin embargo se intentará indagar el comportamiento del sistema.

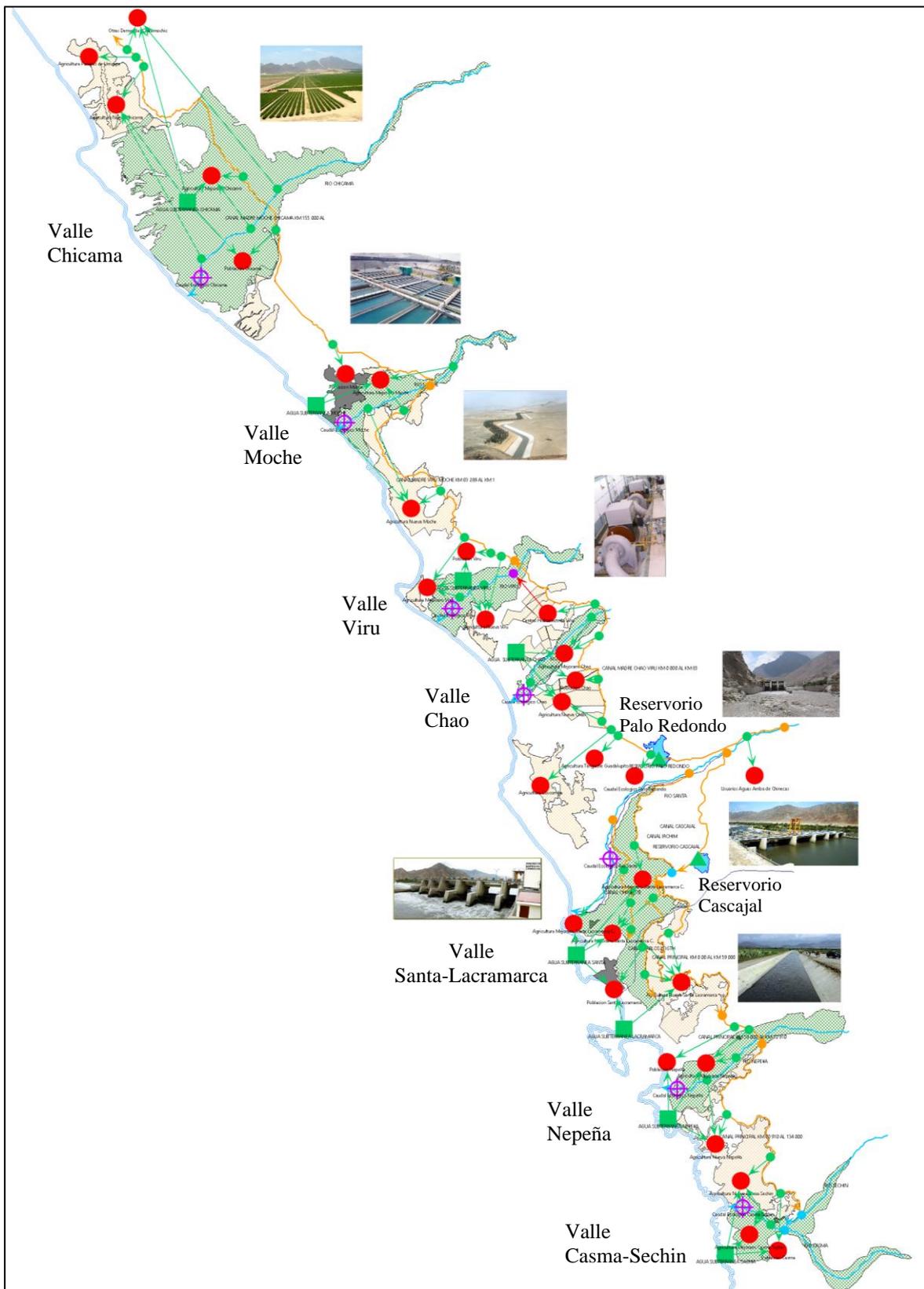


**Figura 46:** Función de probabilidad para los valores de capacidad de almacenamiento.

#### 4.4.5 Escenario 4

En este escenario futuro desde el año 2016 al 2065, se proyectara el embalse Palo Redondo 158 Hm<sup>3</sup> de volumen útil en Chavimochic y Cascajal de 52 Hm<sup>3</sup> de volumen útil en Chinecas, la oferta del sistema se simulara con aportaciones sintéticas de los ríos Casma-Sechin, Nepeña, Santa, Chao, Virú, Moche, Chicama y la explotación de aguas subterráneas de 90 Hm<sup>3</sup> en Chao, Virú, Moche y 185.3 Hm<sup>3</sup> en Chicama según lo propuesto en el estudio de Factibilidad en Chavimochic, la explotación de aguas subterráneas de 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chinecas en los Valles de Santa - Lacramarca, Nepeña y Casma.

Las demandas futuras de Chavimochic incluyen el mejoramiento y ampliación de las áreas de riego en Chao, Virú, Moche, Chicama y la conclusión de las obras de la tercera etapa en donde se irrigara hasta las Pampas de Urricape al norte de Chicama, además la demanda poblacional futura y el aumento de caudal en la central hidroeléctrica de Virú, las demandas futuras en Chinecas comprenden el mejoramiento en los valles Santa-Lacramarca, Nepeña y Casma, y la ampliación de las áreas de riego en los intervalles de estos mismos, a estos agregarle la demanda poblacional futura, todo es posible con la conclusión en la construcción del canal principal hasta el rio Sechin.

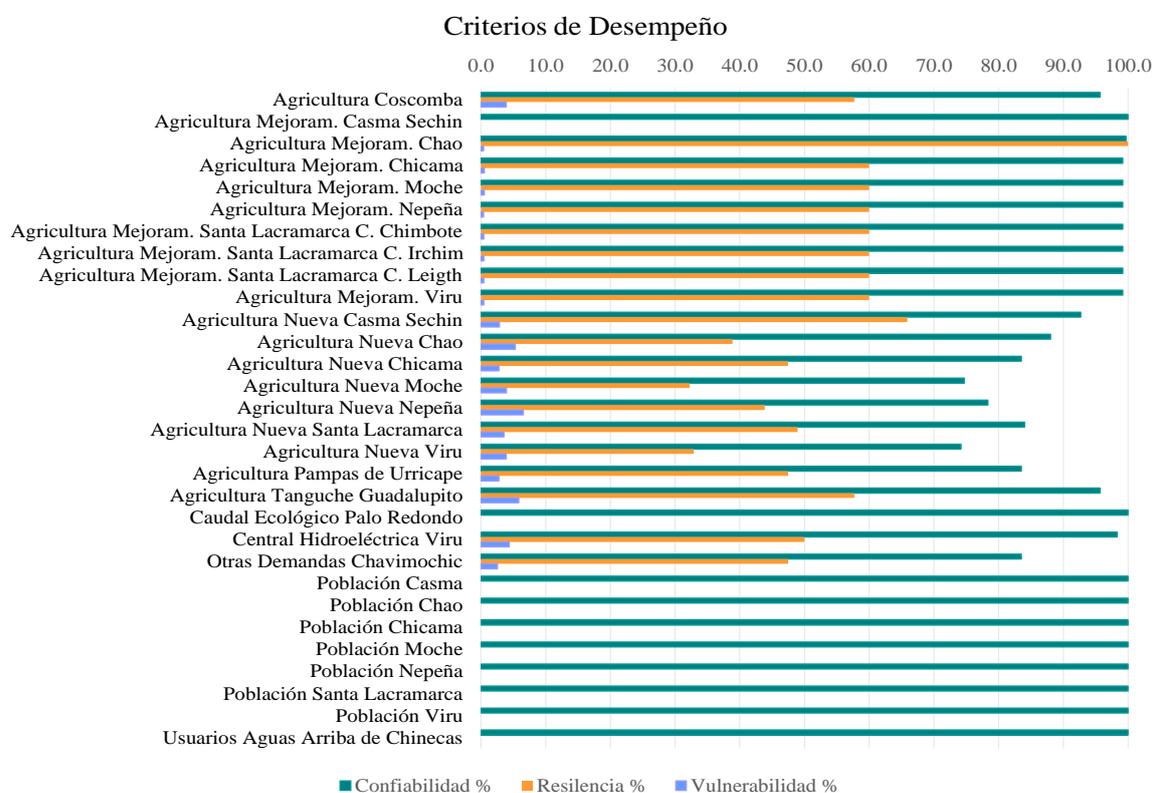


**Figura 47:** Esquema del área de estudio modelo WEAP, escenario 4 y 5.

**Cuadro 50:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm³)	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm³/año)
1	Agricultura Coscomba	600	26	95.67	15	57.69	115.04	3.91	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	2	99.67	2	100.00	0.58	0.40	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	5	99.17	3	60.00	24.15	0.53	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	5	99.17	3	60.00	2.18	0.53	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	5	99.17	3	60.00	2.73	0.39	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	5	99.17	3	60.00	3.13	0.42	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	5	99.17	3	60.00	3.35	0.42	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	5	99.17	3	60.00	2.14	0.42	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	5	99.17	3	60.00	2.37	0.44	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	44	92.67	29	65.91	172.71	2.84	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	72	88.00	28	38.89	771.95	5.29	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	99	83.50	47	47.47	730.41	2.76	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	152	74.67	49	32.24	888.54	3.94	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	130	78.33	57	43.85	386.79	6.54	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	96	84.00	47	48.96	724.77	3.54	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	155	74.17	51	32.90	1139.51	3.91	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	99	83.50	47	47.47	401.34	2.75	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	26	95.67	15	57.69	46.67	5.82	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	10	98.33	5	50.00	24.55	4.35	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	99	83.50	47	47.47	83.65	2.52	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

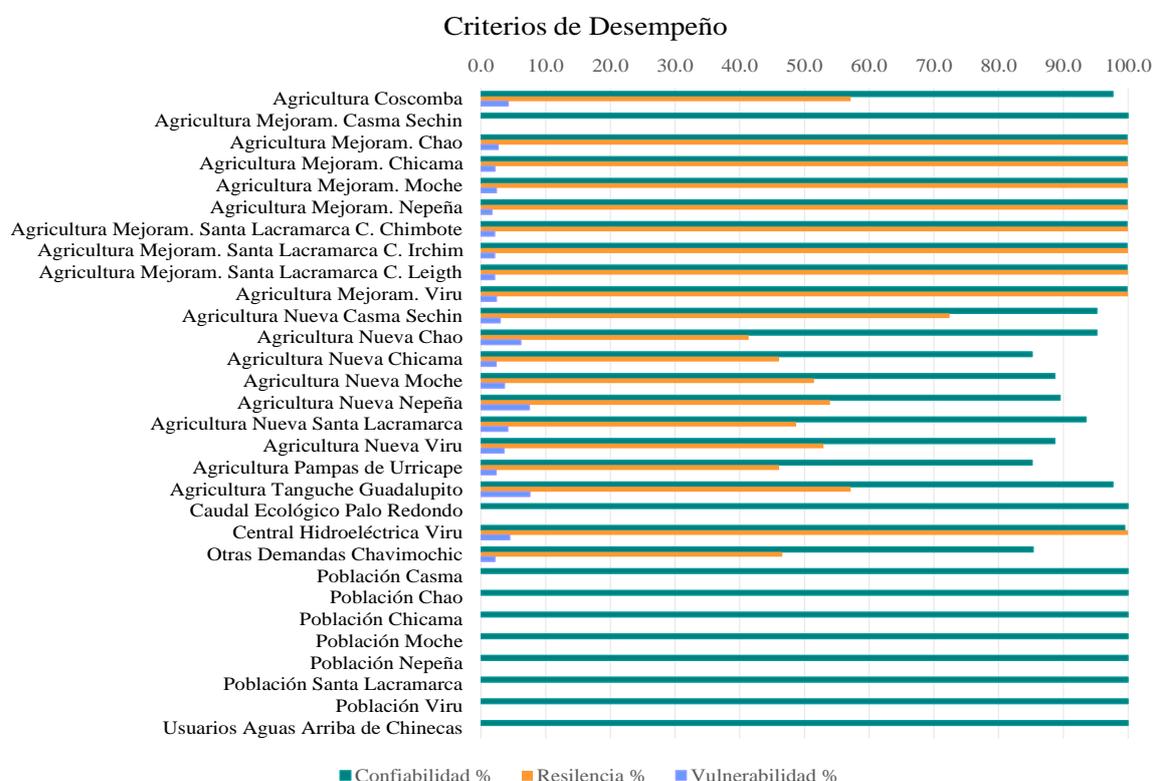


**Figura 48:** Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.

**Cuadro 51: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca**

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	14	97.67	8	57.14	66.86	4.21	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	1	99.83	1	100	1.93	2.65	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	1	99.83	1	100	19.70	2.16	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	1	99.83	1	100	1.98	2.40	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	1	99.83	1	100	2.32	1.67	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	1	99.83	1	100	3.13	2.11	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	1	99.83	1	100	3.35	2.11	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	1	99.83	1	100	2.14	2.11	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	1	99.83	1	100	2.56	2.39	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	29	95.17	21	72.41	118.06	2.94	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	29	95.17	12	41.38	360.65	6.14	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	89	85.17	41	46.07	560.25	2.35	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	68	88.67	35	51.47	366.97	3.63	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	63	89.50	34	53.97	214.40	7.48	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	39	93.50	19	48.72	341.89	4.11	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	68	88.67	36	52.94	453.69	3.55	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	89	85.17	41	46.07	306.23	2.33	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	14	97.67	8	57.14	32.50	7.53	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	3	99.50	3	100.00	7.48	4.42	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	88	85.33	41	46.59	63.33	2.15	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

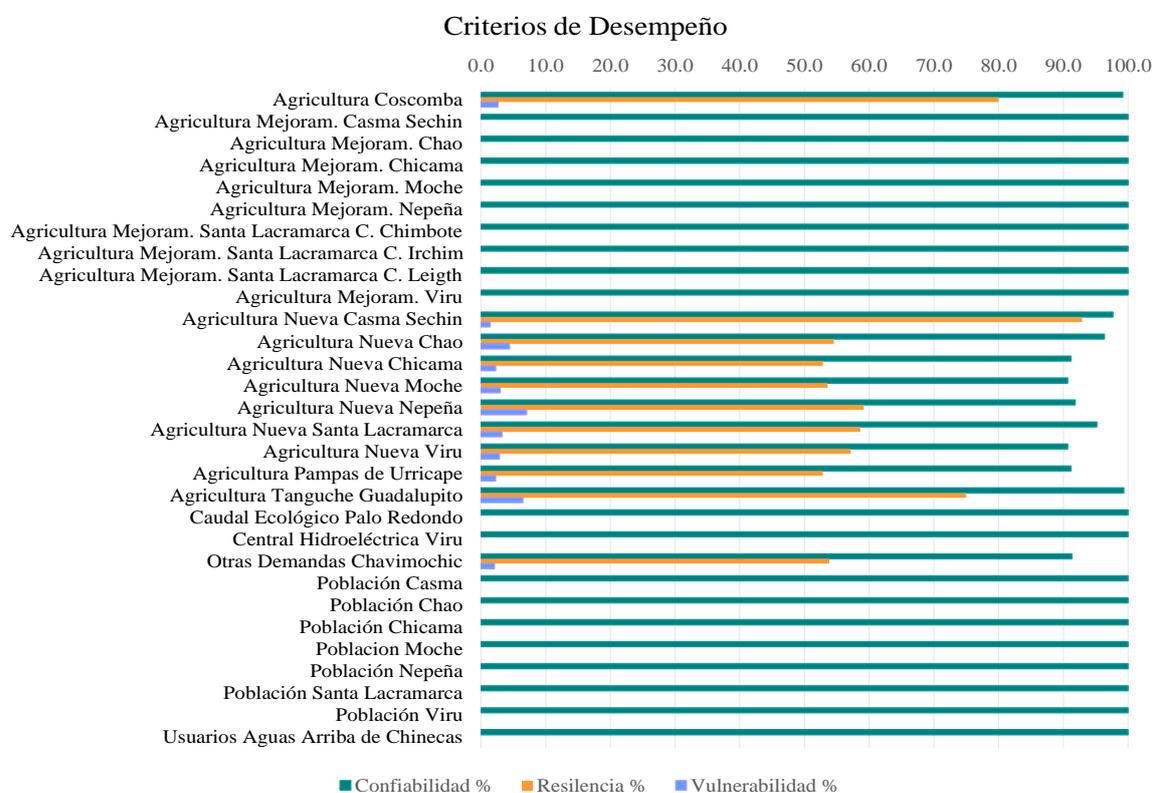


**Figura 49: Criterios de desempeño condición hidrológica seca.**

**Cuadro 52: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal**

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm³)	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm³/año)
1	Agricultura Coscomba	600	5	99.17	4	80	14.71	2.60	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	14	97.67	13	92.86	27.54	1.42	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	22	96.33	12	54.55	195.48	4.39	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	53	91.17	28	52.83	321.66	2.27	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	56	90.67	30	53.57	245.50	2.95	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	49	91.83	29	59.18	156.56	7.03	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	29	95.17	17	58.62	200.41	3.24	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	56	90.67	32	57.14	298.80	2.84	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	53	91.17	28	52.83	175.96	2.25	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	4	99.33	3	75.00	7.98	6.47	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	52	91.33	28	53.85	36.15	2.07	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

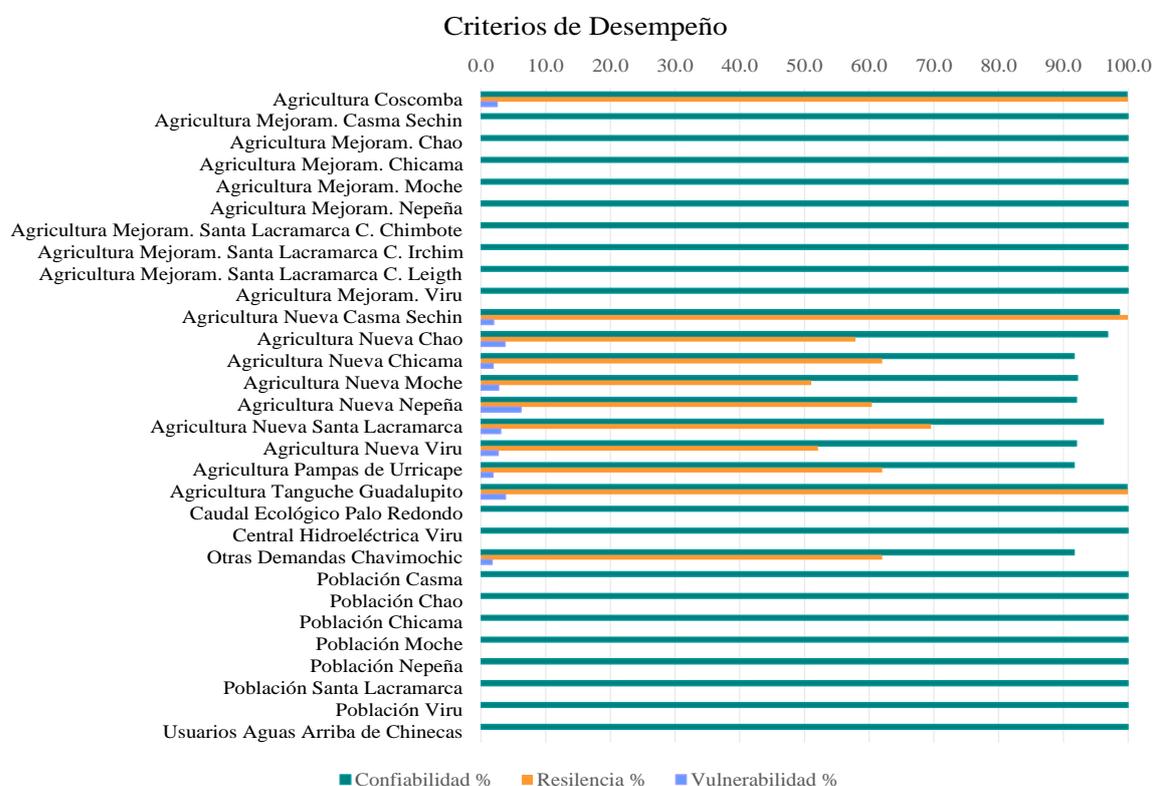


**Figura 50: Criterios de desempeño condición hidrológica normal.**

**Cuadro 53: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica húmeda**

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm³)	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm³/año)
1	Agricultura Coscomba	600	1	99.83	1	100	2.84	2.50	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	8	98.67	8	100.00	21.54	1.95	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	19	96.83	11	57.89	142.02	3.69	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	50	91.67	31	62.00	248.70	1.86	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	47	92.17	24	51.06	189.47	2.71	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	48	92.00	29	60.42	135.38	6.20	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	23	96.17	16	69.57	148.38	3.02	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	48	92.00	25	52.08	238.32	2.64	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	50	91.67	31	62.00	135.16	1.83	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	1	99.83	1	100.00	1.17	3.79	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	50	91.67	31	62.00	28.56	1.70	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

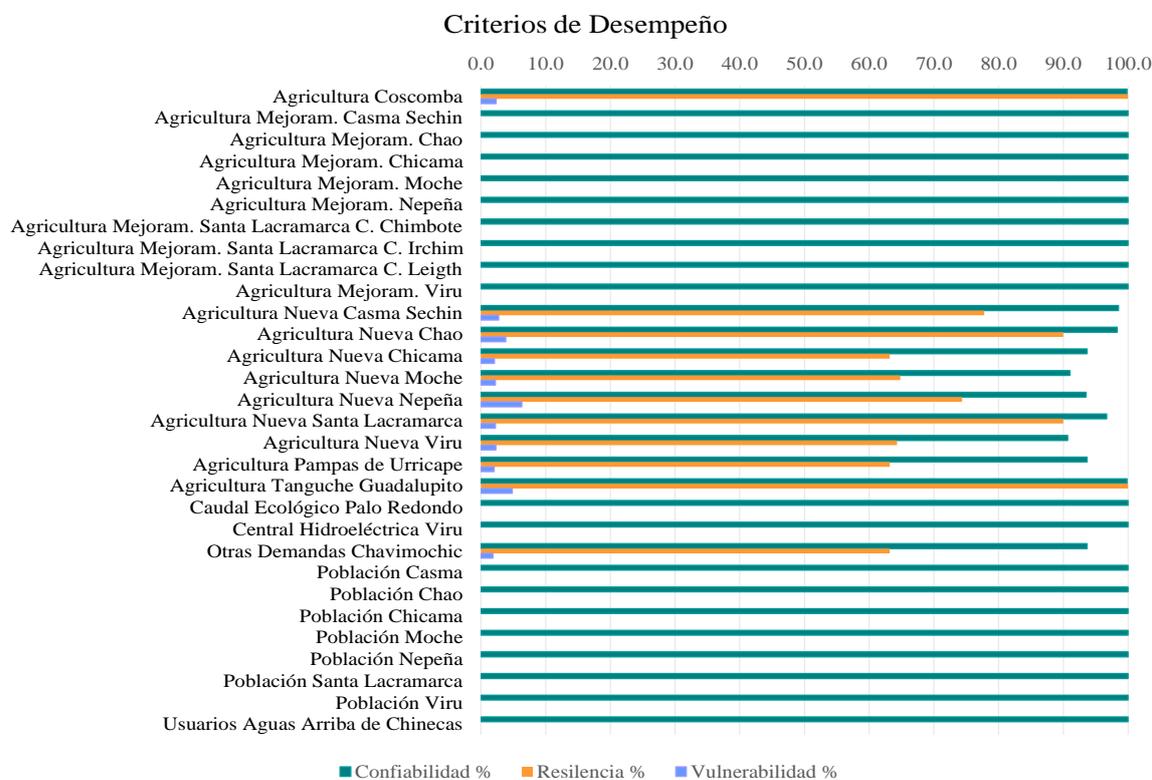


**Figura 51: Criterios de desempeño condición hidrológica húmeda.**

**Cuadro 54:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy húmeda

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	1	99.83	1	100	2.67	2.36	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	9	98.50	7	77.78	34.00	2.73	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	10	98.33	9	90.00	77.27	3.82	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	38	93.67	24	63.16	208.28	2.05	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	54	91.00	35	64.81	178.06	2.22	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	39	93.50	29	74.36	111.49	6.29	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	20	96.67	18	90.00	94.97	2.23	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	56	90.67	36	64.29	240.07	2.28	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	38	93.67	24	63.16	113.22	2.02	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	1	99.83	1	100.00	1.49	4.84	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	38	93.67	24	63.16	23.60	1.85	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable



**Figura 52:** Criterios de desempeño condición hidrológica muy húmeda

### a. Gestión de las demandas

Ante los bajos valores de confiabilidad del sistema en condiciones hidrológicas secas y muy secas es necesario gestionar las prioridades de las demandas y aguas subterráneas.

**Primera Acción.** - Inicialmente las prioridades para Chavimochic y Chincas es el caudal ecológico, consumo humano, mejoramiento de riego, áreas nuevas de riego y otros usos, por lo tanto se implementara una restricción como “Cambios en las Prioridades de Distribución”, de tal manera que haya una reducción en la cobertura de las demandas prioritarias (confiabilidades no menores del 90%), esto ayudara a reducir los impactos del déficit de agua en los usuarios con prioridades mayores. Se realizó la simulación variando las prioridades de distribución de las demandas de riego y otros usos, manteniendo fijo el volumen útil del embalse Palo Redondo de 158 Hm<sup>3</sup> y Cascajal de 52 Hm<sup>3</sup>.

**Segunda Acción.** - En Chavimochic se aumentará el volumen de explotación de aguas subterráneas de 90 Hm<sup>3</sup> a 225 Hm<sup>3</sup> en Chao, Virú, Moche y de 185.3 Hm<sup>3</sup> a 226.74 Hm<sup>3</sup> en Chicama, la explotación de aguas subterráneas de 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chincas se mantendrá en los Valles de Santa - Lacramarca, Nepeña y Casma.

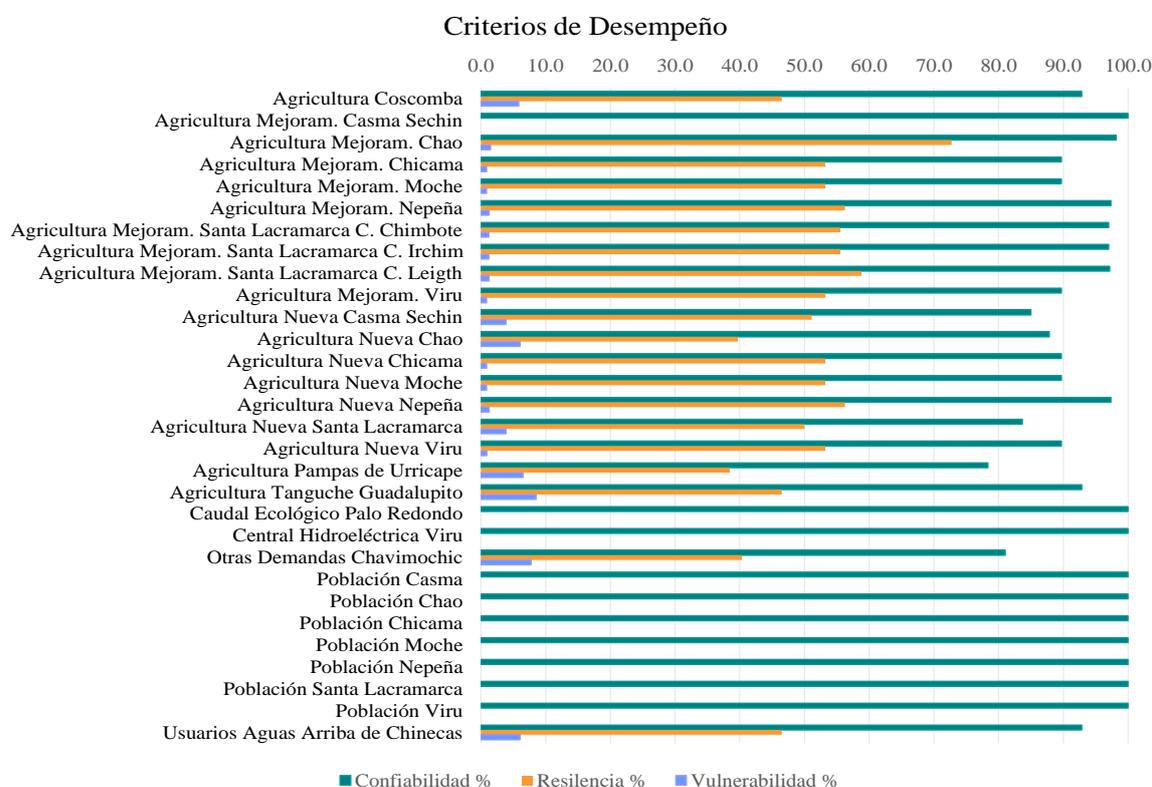
**Cuadro 55:** Valores de Prioridades Propuestas inicialmente y de gestión

N°	Usuarios	Prioridades	
		Propuestas	Gestión
1	Agricultura Coscomba	4	4
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	3	3
3	Agricultura Mejoram. Chao	3	3
4	Agricultura Mejoram. Chicama	3	3
5	Agricultura Mejoram. Moche	3	3
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	3	3
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	3	3
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	3	3
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	3	3
10	Agricultura Mejoram. Viru	3	3
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	4	4
12	Agricultura Nueva Chao	4	4
13	Agricultura Nueva Chicama	4	3
14	Agricultura Nueva Moche	4	3
15	Agricultura Nueva Nepeña	4	3
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	4	4
17	Agricultura Nueva Viru	4	3
18	Agricultura Pampas de Urricape	4	4
19	Agricultura Tanguche Guadalupe	4	4
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	1	1
21	Central Hidroeléctrica Viru	5	6
22	Otras Demandas Chavimochic	4	6
23	Población Casma	1	1
24	Población Chao	1	1
25	Población Chicama	1	1
26	Población Moche	1	1
27	Población Nepeña	1	1
28	Población Santa Lacramarca	1	1
29	Población Viru	1	1
30	Usuarios Aguas Arriba de Chincas	3	4

**Cuadro 56:** “Acción 1” Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	43	92.83	20	46.51	284.51	5.84	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	11	98.17	8	72.73	11.89	1.48	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	62	89.67	33	53.23	497.26	0.88	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	62	89.67	33	53.23	44.26	0.86	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	16	97.33	9	56.25	27.74	1.25	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	18	97.00	10	55.56	31.97	1.20	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	18	97.00	10	55.56	34.21	1.20	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	17	97.17	10	58.82	21.57	1.25	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	62	89.67	33	53.23	57.41	0.86	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	90	85.00	46	51.11	479.61	3.85	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	73	87.83	29	39.73	892.29	6.04	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	62	89.67	33	53.23	143.27	0.86	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	62	89.67	33	53.23	80.41	0.87	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	16	97.33	9	56.25	9.03	1.24	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	98	83.67	49	50.00	809.94	3.88	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	62	89.67	33	53.23	106.76	0.92	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	130	78.33	50	38.46	1250.10	6.52	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	43	92.83	20	46.51	112.79	8.51	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	114	81.00	46	40.35	296.05	7.75	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	43	92.83	20	46.51	176.81	6.02	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

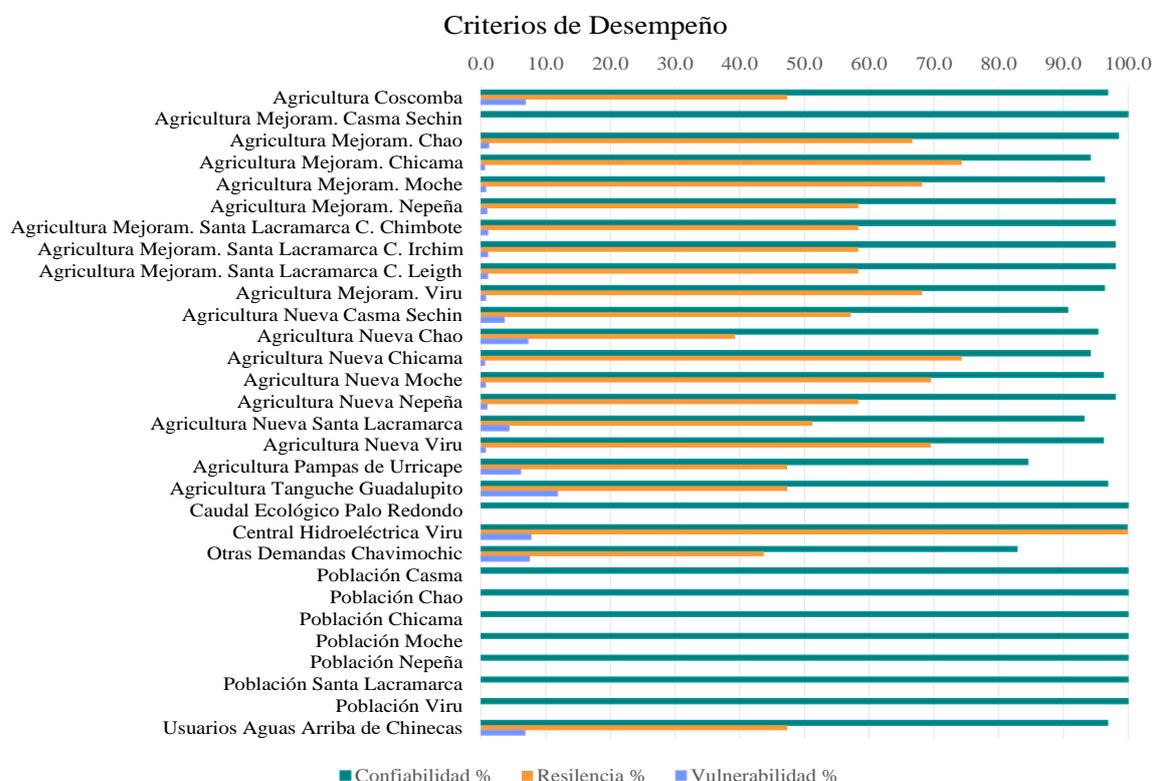


**Figura 53:** Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.

**Cuadro 57:** “Acción 1” Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	19	96.83	9	47.37	147.73	6.86	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	9	98.50	6	66.67	7.68	1.17	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	35	94.17	26	74.29	181.39	0.57	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	22	96.33	15	68.18	12.70	0.70	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	12	98.00	7	58.33	14.94	0.90	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	12	98.00	7	58.33	17.88	1.01	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	12	98.00	7	58.33	19.14	1.01	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	12	98.00	7	58.33	12.25	1.00	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	22	96.33	15	68.18	16.56	0.70	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	56	90.67	32	57.14	277.22	3.58	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	28	95.33	11	39.29	409.42	7.22	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	35	94.17	26	74.29	52.37	0.56	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	23	96.17	16	69.57	22.17	0.65	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	12	98.00	7	58.33	4.84	0.89	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	41	93.17	21	51.22	379.25	4.34	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	23	96.17	16	69.57	29.16	0.67	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	93	84.50	44	47.31	838.67	6.11	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	19	96.83	9	47.37	69.23	11.82	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	1	99.83	1	100.00	4.34	7.69	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	103	82.83	45	43.69	257.51	7.46	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinescas	600	19	96.83	9	47.37	87.79	6.77	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

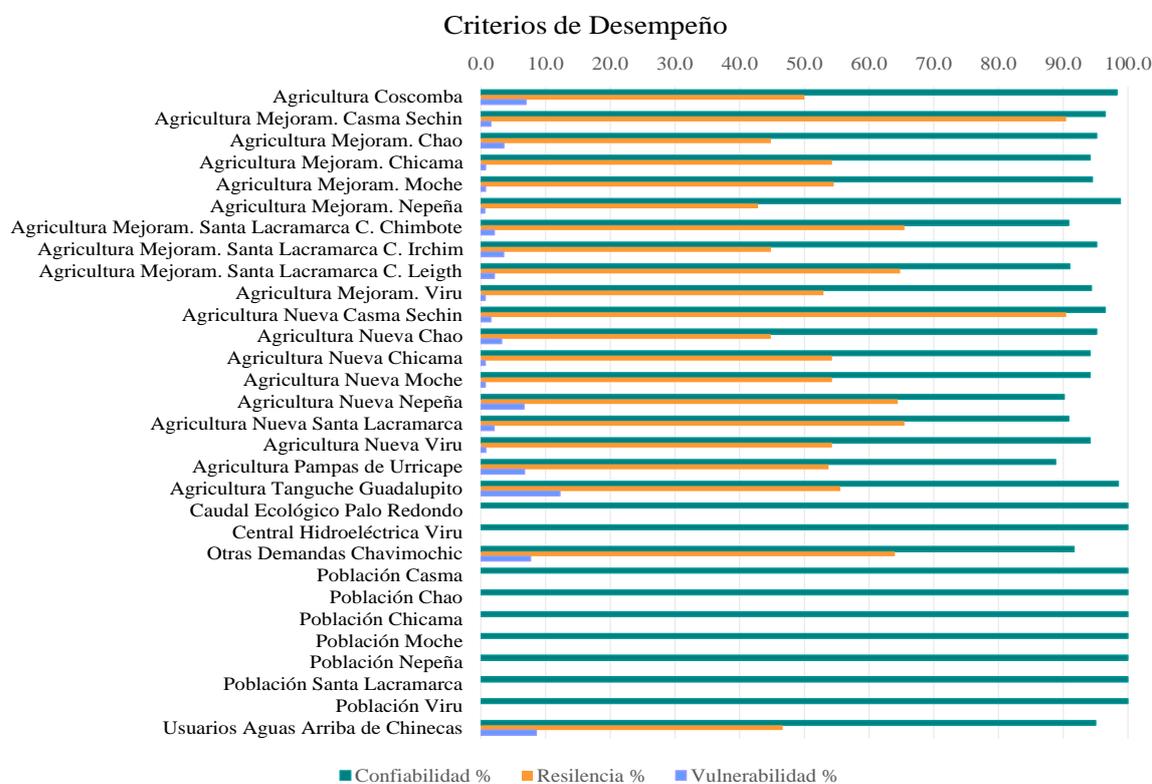


**Figura 54:** Criterios de desempeño condición hidrológica seca.

**Cuadro 58:** “Acción 2” Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	10	98.33	5	50.00	79.01	6.97	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	21	96.50	19	90.48	19.87	1.52	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	29	95.17	13	44.83	75.11	3.54	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	35	94.17	19	54.29	222.09	0.70	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	33	94.50	18	54.55	19.26	0.70	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	7	98.83	3	42.86	5.58	0.57	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	55	90.83	36	65.45	166.93	2.05	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	29	95.17	13	44.83	161.26	3.51	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	54	91.00	35	64.81	113.45	2.07	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	34	94.33	18	52.94	24.92	0.68	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	21	96.50	19	90.48	44.30	1.52	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	29	95.17	13	44.83	188.44	3.21	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	35	94.17	19	54.29	62.46	0.67	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	35	94.17	19	54.29	35.47	0.68	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	59	90.17	38	64.41	178.96	6.67	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	55	90.83	36	65.45	238.42	2.03	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	35	94.17	19	54.29	48.94	0.74	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	67	88.83	36	53.73	665.60	6.73	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	9	98.50	5	55.56	33.90	12.22	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	50	91.67	32	64.00	128.66	7.68	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	30	95.00	14	46.67	175.53	8.57	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

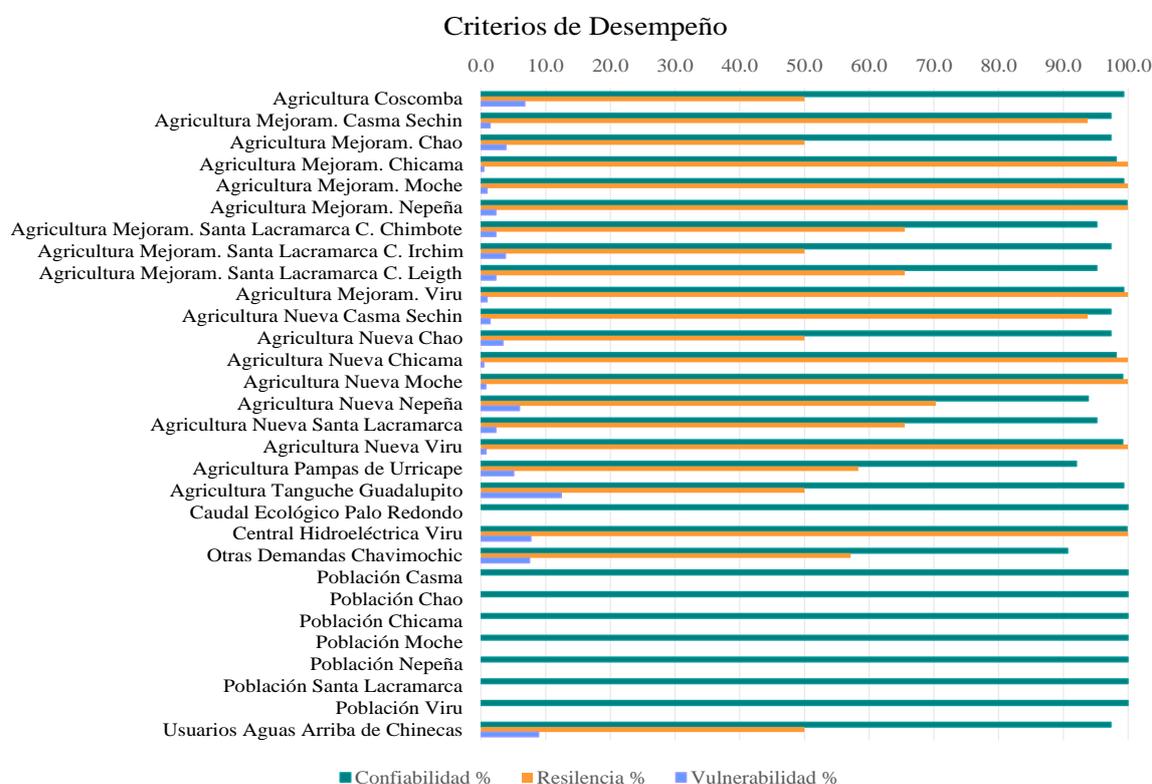


**Figura 55:** Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.

**Cuadro 59: “Acción 2” Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca**

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm³)	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm³/año)
1	Agricultura Coscomba	600	4	99.33	2	50.00	30.60	6.75	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	16	97.33	15	93.75	14.03	1.41	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	16	97.33	8	50.00	44.87	3.84	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	11	98.17	11	100.00	44.84	0.45	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	4	99.33	4	100.00	3.06	0.92	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	1	99.83	1	100.00	3.21	2.31	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	29	95.17	19	65.52	98.33	2.29	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	16	97.33	8	50.00	96.09	3.79	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	29	95.17	19	65.52	67.37	2.29	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	4	99.33	4	100.00	3.97	0.92	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	16	97.33	15	93.75	31.27	1.41	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	16	97.33	8	50.00	110.17	3.40	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	11	98.17	11	100.00	12.97	0.44	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	5	99.17	5	100.00	5.45	0.73	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	37	93.83	26	70.27	100.04	5.94	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	29	95.17	19	65.52	141.57	2.29	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	5	99.17	5	100.00	7.20	0.77	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	48	92.00	28	58.33	358.73	5.07	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	4	99.33	2	50.00	15.29	12.40	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	1	99.83	1	100.00	4.34	7.70	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	56	90.67	32	57.14	141.07	7.52	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinescas	600	16	97.33	8	50.00	97.32	8.91	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable



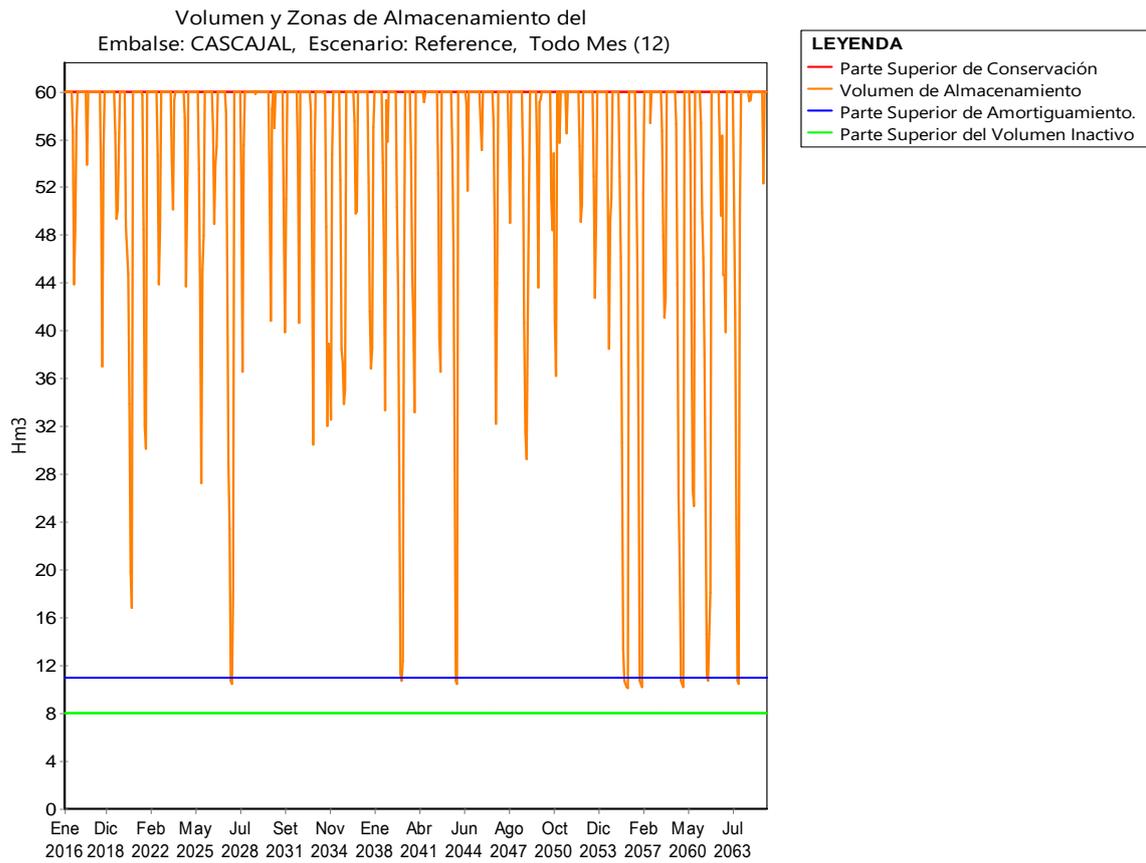
**Figura 56: Criterios de desempeño condición hidrológica seca.**

**Cuadro 60:** Resumen de los valores Confiabilidad para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, para diferentes condiciones hidrológicas y diferentes formas de gestión

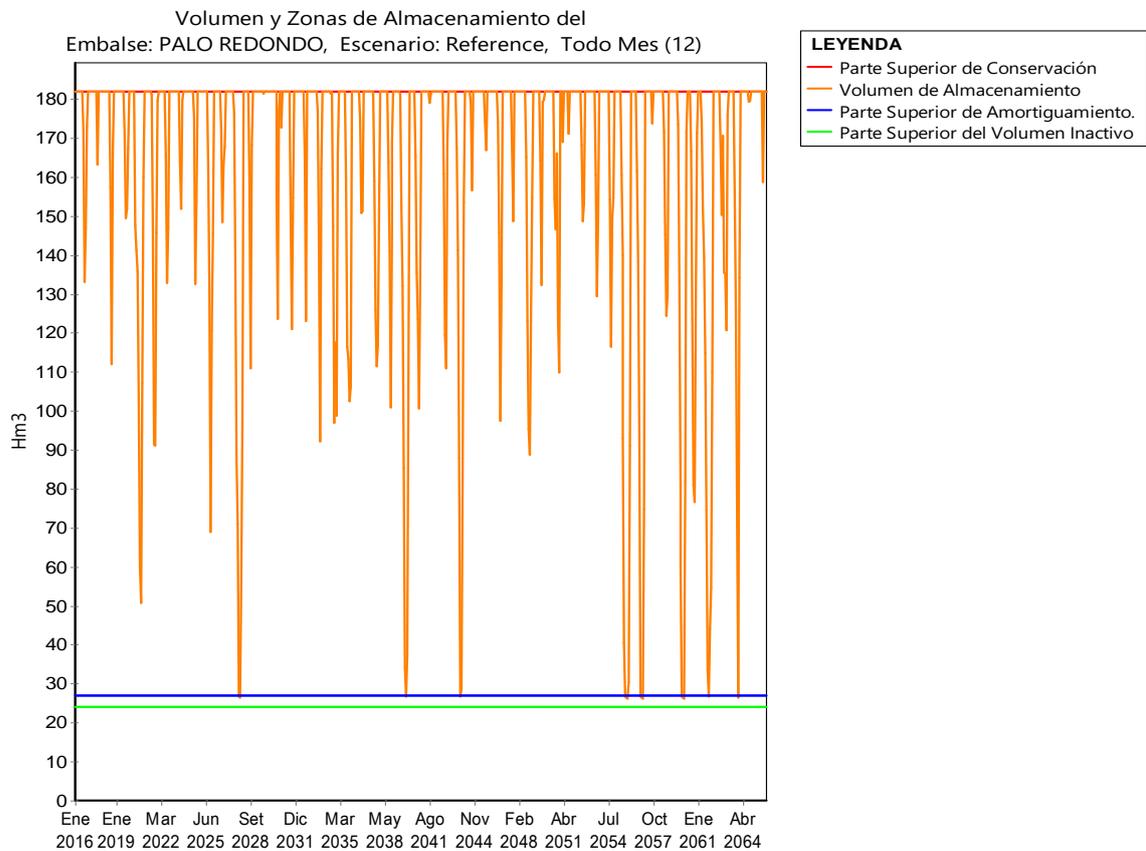
N°	Usuarios	Condición Hidrológica								
		Subterran. Muy seca	Gestión Muy seca	Muy seca	Subterran. seca	Gestión seca	Seca	Normal	Húmeda	Muy Húmeda
1	Agricultura Coscomba	98.33	92.83	95.67	99.33	96.83	97.67	99.17	99.83	99.83
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	96.50	100.00	100.00	97.33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3	Agricultura Mejoram. Chao	95.17	98.17	99.67	97.33	98.50	99.83	100.00	100.00	100.00
4	Agricultura Mejoram. Chicama	94.17	89.67	99.17	98.17	94.17	99.83	100.00	100.00	100.00
5	Agricultura Mejoram. Moche	94.50	89.67	99.17	99.33	96.33	99.83	100.00	100.00	100.00
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	98.83	97.33	99.17	99.83	98.00	99.83	100.00	100.00	100.00
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	90.83	97.00	99.17	95.17	98.00	99.83	100.00	100.00	100.00
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	95.17	97.00	99.17	97.33	98.00	99.83	100.00	100.00	100.00
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	91.00	97.17	99.17	95.17	98.00	99.83	100.00	100.00	100.00
10	Agricultura Mejoram. Viru	94.33	89.67	99.17	99.33	96.33	99.83	100.00	100.00	100.00
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	96.50	85.00	92.67	97.33	90.67	95.17	97.67	98.67	98.50
12	Agricultura Nueva Chao	95.17	87.83	88.00	97.33	95.33	95.17	96.33	96.83	98.33
13	Agricultura Nueva Chicama	94.17	89.67	83.50	98.17	94.17	85.17	91.17	91.67	93.67
14	Agricultura Nueva Moche	94.17	89.67	74.67	99.17	96.17	88.67	90.67	92.17	91.00
15	Agricultura Nueva Nepeña	90.17	97.33	78.33	93.83	98.00	89.50	91.83	92.00	93.50
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	90.83	83.67	84.00	95.17	93.17	93.50	95.17	96.17	96.67
17	Agricultura Nueva Viru	94.17	89.67	74.17	99.17	96.17	88.67	90.67	92.00	90.67
18	Agricultura Pampas de Urricape	88.83	78.33	83.50	92.00	84.50	85.17	91.17	91.67	93.67
19	Agricultura Tanguche Guadalupe	98.50	92.83	95.67	99.33	96.83	97.67	99.33	99.83	99.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
21	Central Hidroeléctrica Viru	100.00	100.00	98.33	99.83	99.83	99.50	100.00	100.00	100.00
22	Otras Demandas Chavimochic	91.67	81.00	83.50	90.67	82.83	85.33	91.33	91.67	93.67
23	Población Casma	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
24	Población Chao	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	Población Chicama	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
26	Población Moche	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
27	Población Nepeña	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
28	Población Santa Lacramarca	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
29	Población Viru	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	95.00	92.83	100.00	97.33	96.83	100.00	100.00	100.00	100.00

**Cuadro 61:** Comparativo del almacenamiento en los reservorios Cascajal y Palo Redondo

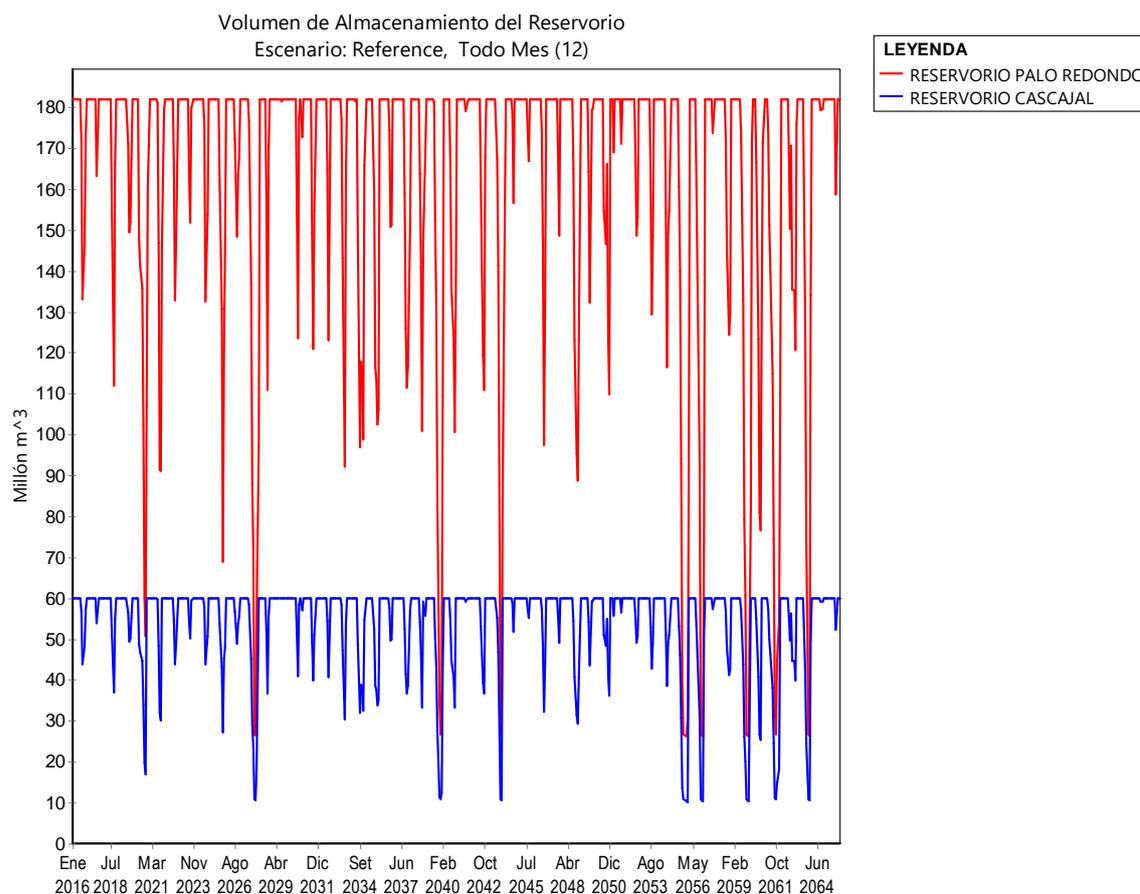
Reservorio / Condición Hidrológica	Volumen Mínimo (Hm3)	Volumen Útil (Hm3)	Nivel Mínimo (msnm)	Volumen Promedio (Hm3)	Volumen Útil (Hm3)	Nivel Promedio (msnm)	Volumen Máximo (Hm3)	Volumen Útil (Hm3)	Nivel Máximo (msnm)	Volumen Sedimento (Hm3)
<b>Muy seca</b>										
Reservorio Cascajal	9.59	1.59	277.50	45.47	37.47	292.76	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	25.59	1.59	284.08	130.10	106.10	310.22	182.00	158.00	320.20	24
<b>Seca</b>										
Reservorio Cascajal	9.78	1.78	277.64	50.39	42.39	294.67	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	25.97	1.97	284.28	147.90	123.90	314.01	182.00	158.00	320.20	24
<b>Normal</b>										
Reservorio Cascajal	9.97	1.97	277.79	51.49	43.49	295.09	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	25.98	1.98	284.29	151.85	127.85	314.81	182.00	158.00	320.20	24
<b>Húmeda</b>										
Reservorio Cascajal	9.97	1.97	277.79	51.70	43.70	295.17	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	25.97	1.97	284.28	152.19	128.19	314.92	182.00	158.00	320.20	24
<b>Muy húmeda</b>										
Reservorio Cascajal	10.29	2.29	278.04	52.91	44.91	295.62	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	26.43	2.43	284.54	156.72	132.72	315.84	182.00	158.00	320.20	24
<b>Acción 1: Muy seca</b>										
Reservorio Cascajal	9.59	1.59	277.50	45.36	37.36	292.72	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	25.59	1.59	284.08	129.67	105.67	310.13	182.00	158.00	320.20	24
<b>Acción 1: Seca</b>										
Reservorio Cascajal	9.78	1.78	277.64	50.39	42.39	294.67	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	25.81	1.81	284.20	147.84	123.84	313.99	182.00	158.00	320.20	24
<b>Acción 2: Muy seca</b>										
Reservorio Cascajal	9.59	1.59	277.50	49.38	41.38	294.33	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	25.59	1.59	284.08	146.10	122.10	313.67	182.00	158.00	320.20	24
<b>Acción 2: Seca</b>										
Reservorio Cascajal	10.13	2.13	277.92	54.01	46.01	295.97	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	26.19	2.19	284.40	162.01	138.01	316.67	182.00	158.00	320.20	24



**Figura 57:** Volumen y zonas de almacenamiento Embalse Cascajal.



**Figura 58:** Volumen y zonas de almacenamiento Embalse Palo Redondo.



**Figura 59:** Volumen de almacenamiento Embalse Cascajal y Palo Redondo.

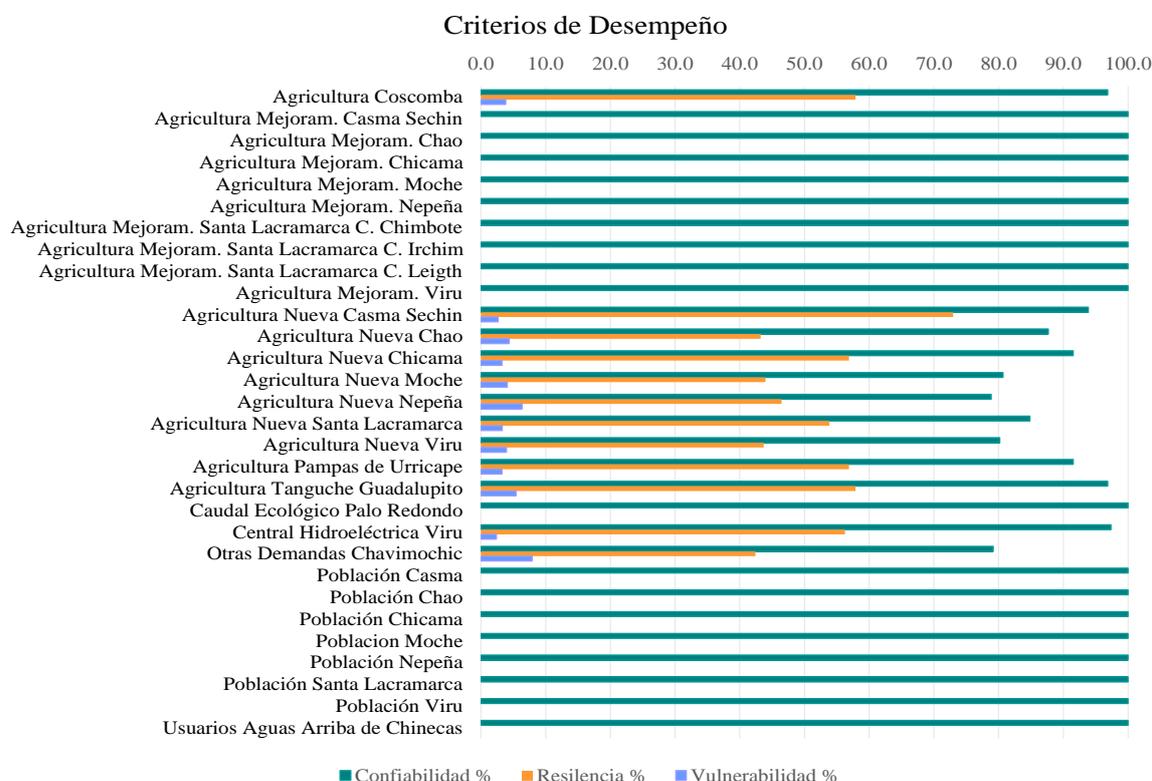
#### 4.4.6 Escenario 5

En este escenario futuro desde el año 2016 al 2065, se proyectara el embalse Palo Redondo 70 Hm<sup>3</sup> de volumen útil en Chavimochic y Cascajal de 52 Hm<sup>3</sup> de volumen útil en Chincas, la oferta del sistema se simulara con aportaciones sintéticas de los ríos Casma-Sechin, Nepeña, Santa, Chao, Virú, Moche, Chicama y aumentara la explotación de aguas subterráneas de 90 Hm<sup>3</sup> a 225 Hm<sup>3</sup> en Chao, Virú, Moche y de 185.3 Hm<sup>3</sup> a 226.74 Hm<sup>3</sup> en Chicama, la explotación de aguas subterráneas de 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chincas se mantendrá en los Valles de Santa - Lacramarca, Nepeña y Casma. Las demandas futuras de Chavimochic incluyen el mejoramiento y ampliación de las áreas de riego en Chao, Virú, Moche, Chicama y la conclusión de las obras de la tercera etapa en donde se irrigara hasta las Pampas de Urricape al norte de Chicama, además la demanda poblacional futura y el aumento de caudal en la central hidroeléctrica de Virú, las demandas futuras en Chincas comprenden el mejoramiento en los valles Santa- Lacramarca, Nepeña y Casma, y la ampliación de las áreas de riego en los intervalles de estos mismos.

**Cuadro 62: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca**

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	19	96.83	11	57.89	82.20	3.82	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	37	93.83	27	72.97	134.98	2.64	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	74	87.67	32	43.24	652.06	4.35	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	51	91.50	29	56.86	439.84	3.22	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	116	80.67	51	43.97	699.97	4.06	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	127	78.83	59	46.46	367.30	6.36	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	91	84.83	49	53.85	634.16	3.27	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	119	80.17	52	43.70	881.20	3.94	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	51	91.50	29	56.86	242.89	3.23	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	19	96.83	11	57.89	31.79	5.43	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	16	97.33	9	56.25	21.54	2.39	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	125	79.17	53	42.40	330.90	7.90	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Poblacion Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

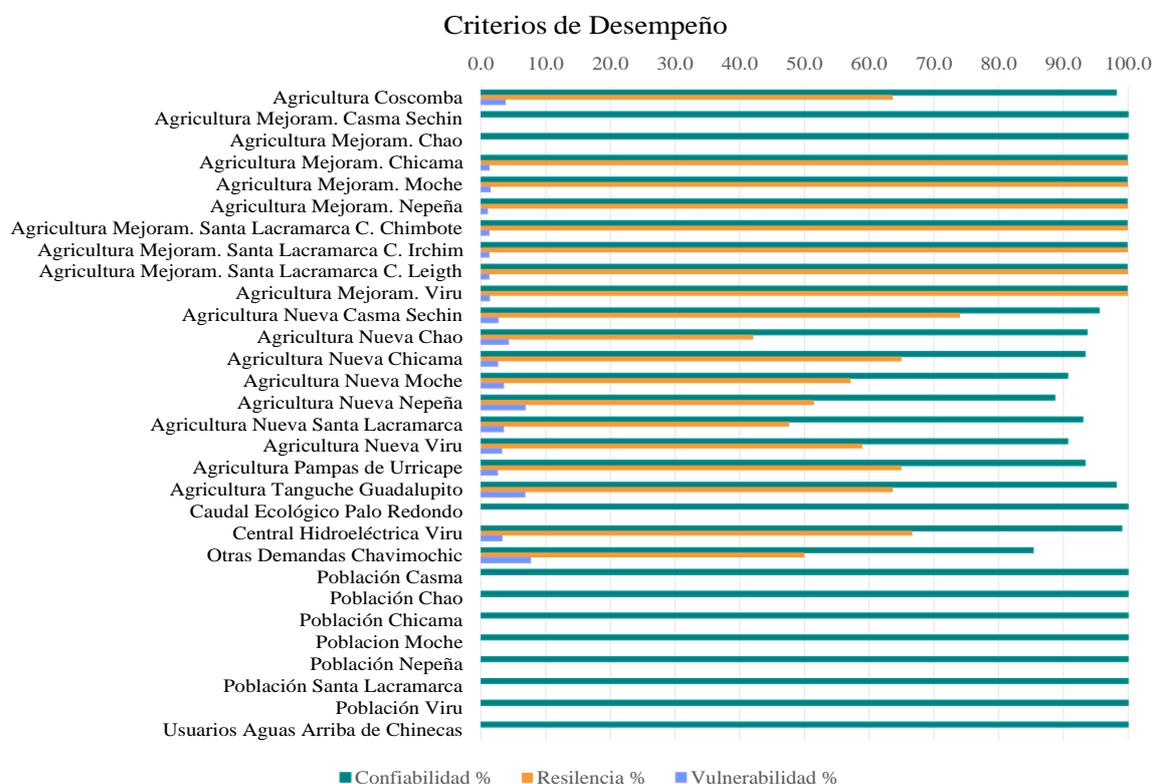


**Figura 60: Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.**

**Cuadro 63:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	11	98.17	7	63.64	46.62	3.74	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	1	99.83	1	100.00	11.44	1.26	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	1	99.83	1	100.00	1.15	1.39	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	1	99.83	1	100.00	1.35	0.97	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	1	99.83	1	100.00	1.81	1.22	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	1	99.83	1	100.00	1.94	1.22	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	1	99.83	1	100.00	1.24	1.22	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	1	99.83	1	100.00	1.37	1.27	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	27	95.50	20	74.07	96.98	2.60	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	38	93.67	16	42.11	328.06	4.26	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	40	93.33	26	65.00	274.16	2.56	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	56	90.67	32	57.14	288.99	3.48	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	68	88.67	35	51.47	210.97	6.82	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	42	93.00	20	47.62	309.99	3.46	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	56	90.67	33	58.93	337.69	3.21	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	40	93.33	26	65.00	150.61	2.55	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	11	98.17	7	63.64	22.96	6.77	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	6	99.00	4	66.67	10.97	3.24	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	88	85.33	44	50.00	224.55	7.61	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

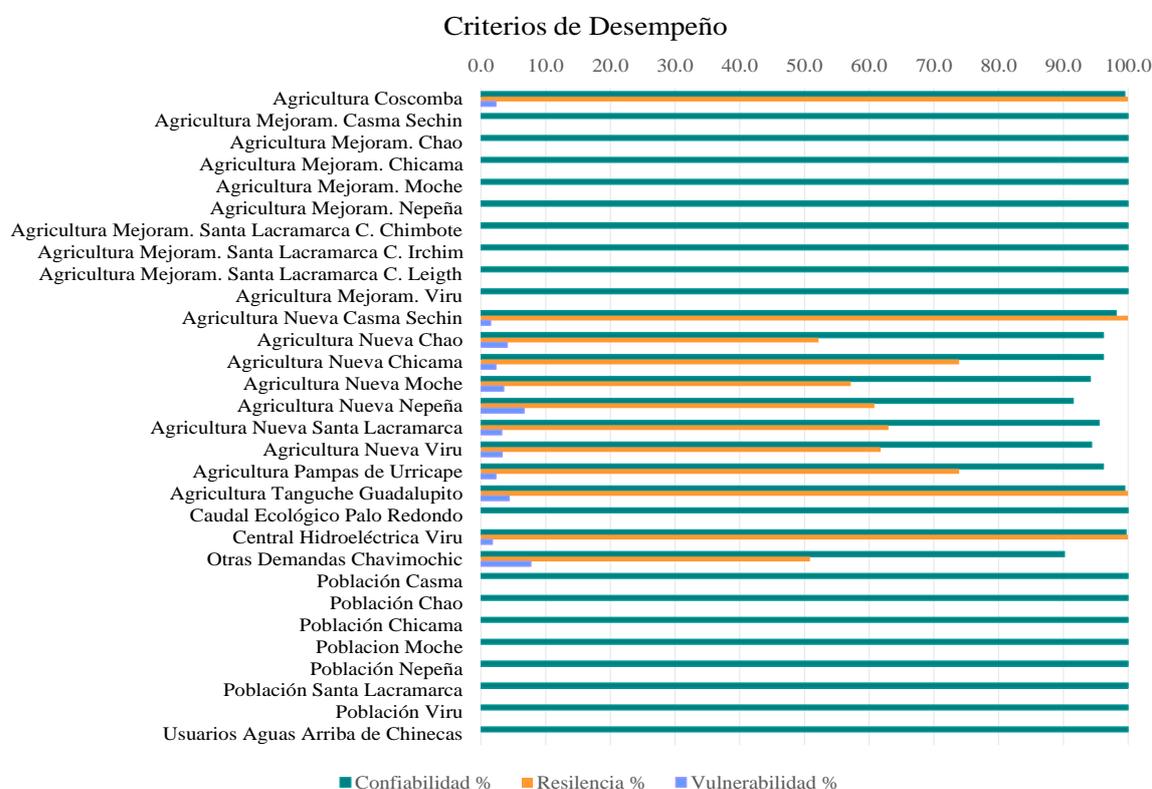


**Figura 61:** Criterios de desempeño condición hidrológica seca.

**Cuadro 64:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica normal

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	3	99.50	3	100	7.87	2.32	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	11	98.17	11	100.00	22.33	1.47	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	23	96.17	12	52.17	188.02	4.04	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	23	96.17	17	73.91	141.52	2.30	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	35	94.17	20	57.14	181.63	3.49	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	51	91.50	31	60.78	154.09	6.64	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	27	95.50	17	62.96	183.88	3.19	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	34	94.33	21	61.76	208.32	3.26	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	23	96.17	17	73.91	77.99	2.30	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	3	99.50	3	100.00	4.03	4.36	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	2	99.67	2	100.00	1.98	1.76	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	59	90.17	30	50.85	152.37	7.70	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

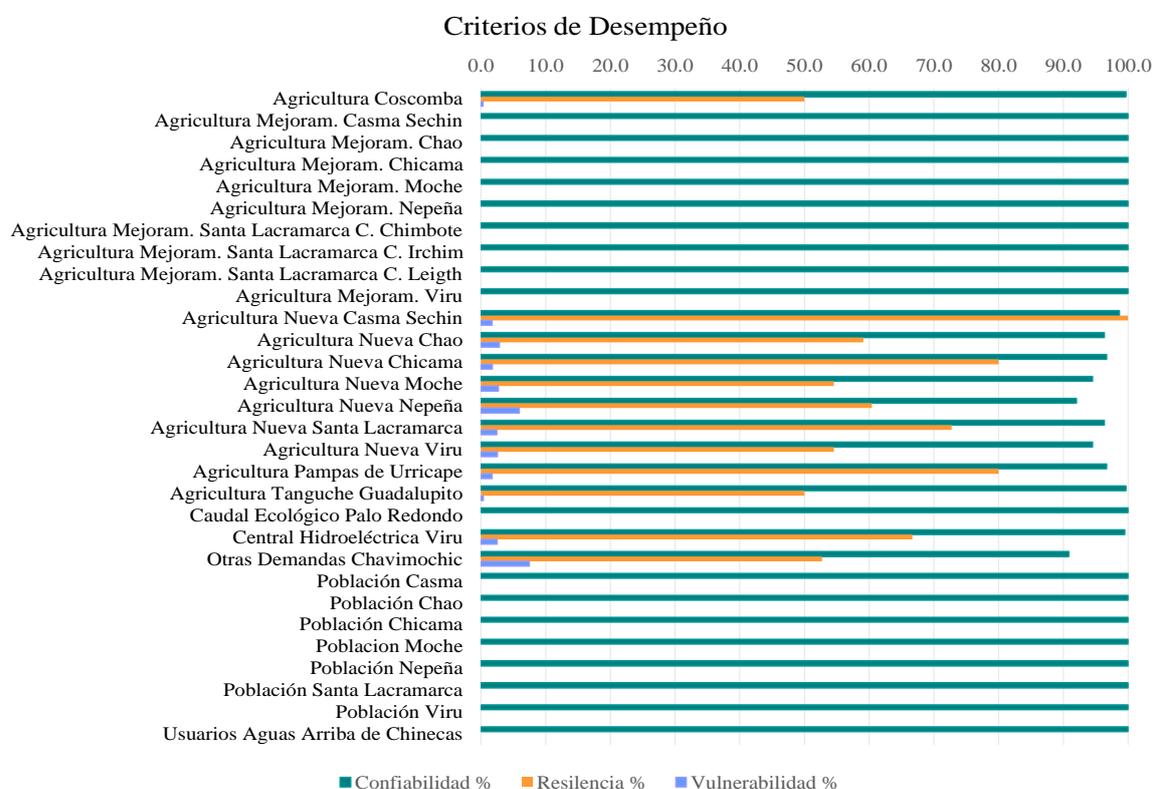


**Figura 62:** Criterios de desempeño condición hidrológica normal.

**Cuadro 65:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica húmeda

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	2	99.67	1	50	0.72	0.32	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	8	98.67	8	100.00	18.81	1.70	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	22	96.33	13	59.09	126.29	2.83	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	20	96.67	16	80.00	93.48	1.75	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	33	94.50	18	54.55	132.42	2.70	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	48	92.00	29	60.42	129.49	5.93	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	22	96.33	16	72.73	115.20	2.46	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	33	94.50	18	54.55	157.66	2.54	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	20	96.67	16	80.00	50.85	1.72	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	2	99.67	1	50.00	0.23	0.37	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	3	99.50	2	66.67	4.20	2.48	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	55	90.83	29	52.73	137.85	7.48	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Poblacion Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

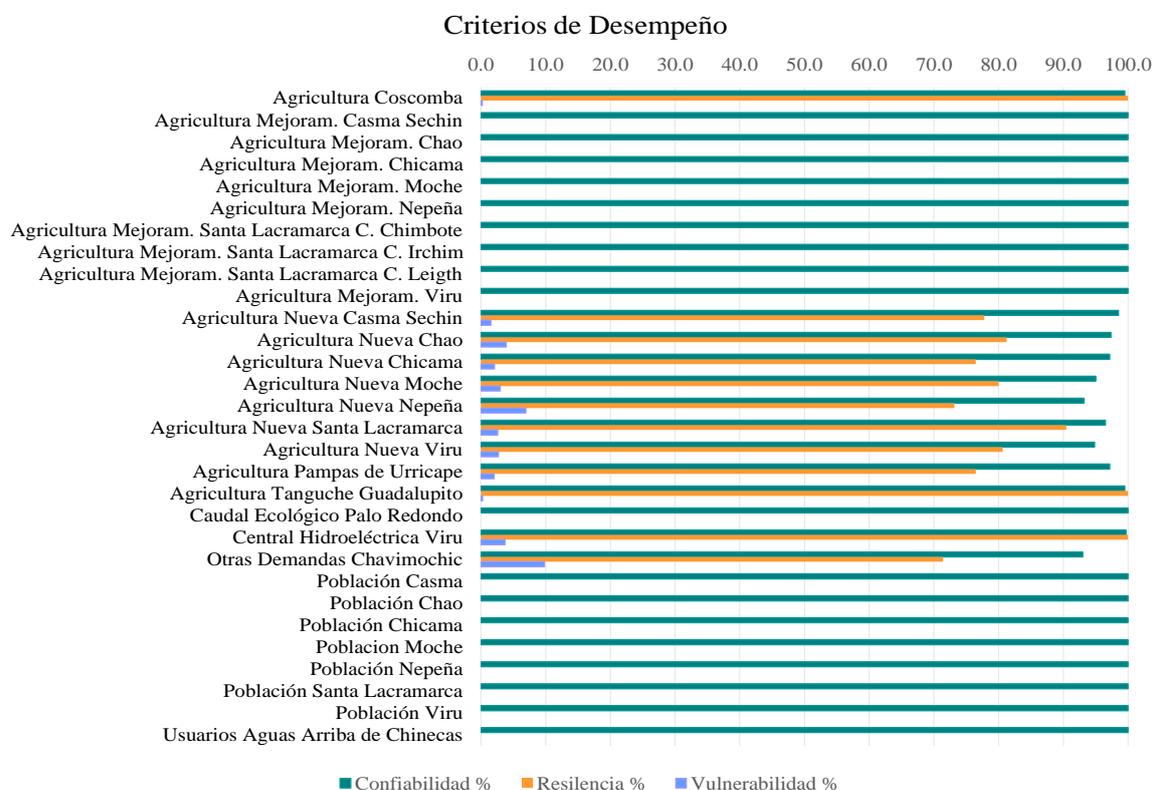


**Figura 63:** Criterios de desempeño condición hidrológica húmeda.

**Cuadro 66:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy húmeda

Nº	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm³)	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm³/año)
1	Agricultura Coscomba	600	3	99.50	3	100	0.72	0.21	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leighth	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	9	98.50	7	77.78	18.81	1.51	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	16	97.33	13	81.25	126.29	3.90	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	17	97.17	13	76.47	93.48	2.06	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	30	95.00	24	80.00	132.42	2.97	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	41	93.17	30	73.17	129.49	6.94	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	21	96.50	19	90.48	115.20	2.57	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	31	94.83	25	80.65	157.66	2.71	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	17	97.17	13	76.47	50.85	2.03	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	3	99.50	3	100.00	0.23	0.25	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	2	99.67	2	100.00	4.20	3.72	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	42	93.00	30	71.43	137.85	9.79	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable



**Figura 64:** Criterios de desempeño condición hidrológica muy húmeda.

### a. Gestión de las demandas

Ante los bajos valores de confiabilidad del sistema en condiciones hidrológicas secas y muy secas es necesario gestionar las prioridades de las demandas.

Para la gestión futura del sistema, bajar el valor de estimación de confiabilidad en las demandas, sobre todo de las prioritarias, para Chavimochic y Chincas el uso prioritario es el caudal ecológico, consumo humano, mejoramiento de riego, áreas nuevas de riego y otros usos por lo tanto se implementara una restricción como “Cambios en las Prioridades de Distribución”, de tal manera que haya una reducción en la cobertura de las demandas prioritarias (confiabilidades no menores del 90%), esto ayudara a reducir los impactos del déficit de agua en los usuarios con prioridades mayores. Se realizó la simulación variando las prioridades en las demandas de riego y otros usos, manteniendo fija el volumen útil del embalse en Palo Redondo de 70 Hm<sup>3</sup> y Cascajal de 52 Hm<sup>3</sup>. Los resultados de este procedimiento se describen a continuación con los criterios de desempeño de Confiabilidad, Resiliencia y Vulnerabilidad.

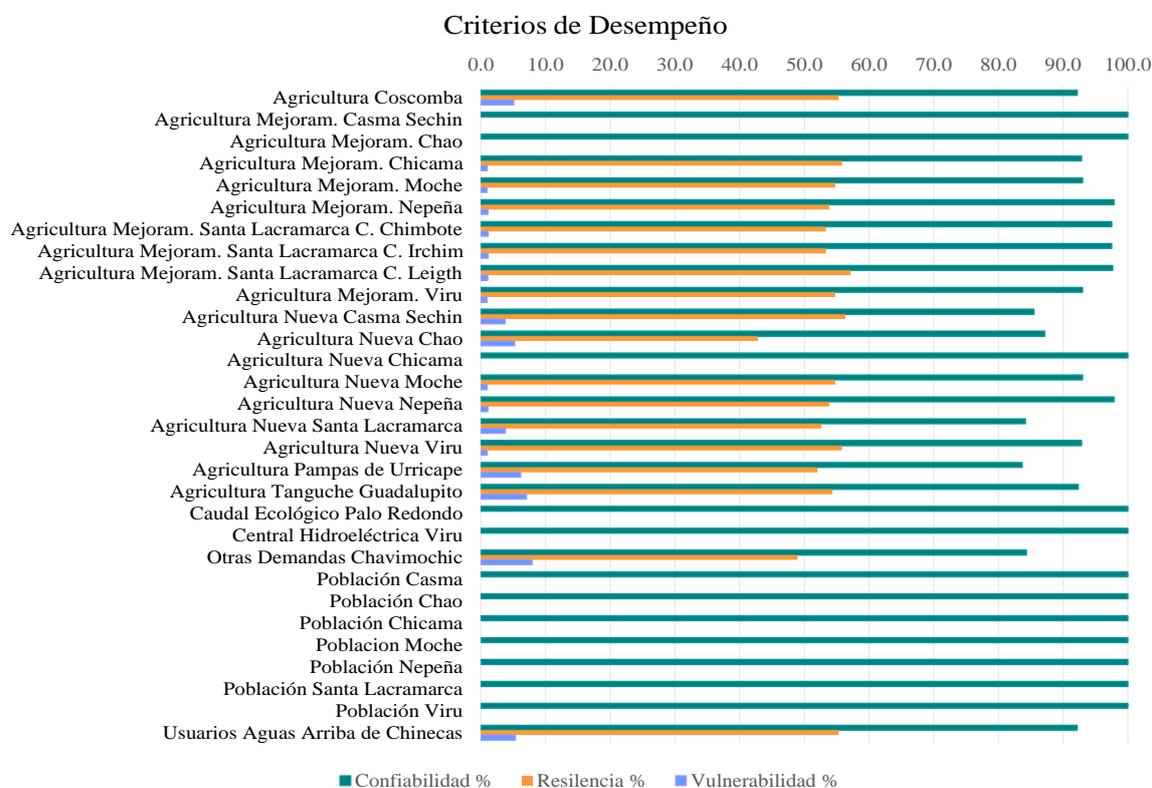
**Cuadro 67:** Valores de Prioridades Propuestas iniciales y de gestión

N°	Usuarios	Prioridades	
		Propuesta	Gestión
1	Agricultura Coscomba	4	4
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	3	3
3	Agricultura Mejoram. Chao	3	3
4	Agricultura Mejoram. Chicama	3	3
5	Agricultura Mejoram. Moche	3	3
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	3	3
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	3	3
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	3	3
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	3	3
10	Agricultura Mejoram. Viru	3	3
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	4	4
12	Agricultura Nueva Chao	4	4
13	Agricultura Nueva Chicama	4	3
14	Agricultura Nueva Moche	4	3
15	Agricultura Nueva Nepeña	4	3
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	4	4
17	Agricultura Nueva Viru	4	3
18	Agricultura Pampas de Urricape	4	4
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	4	4
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	1	1
21	Central Hidroeléctrica Viru	5	5
22	Otras Demandas Chavimochic	4	6
23	Población Casma	1	1
24	Población Chao	1	1
25	Población Chicama	1	1
26	Población Moche	1	1
27	Población Nepeña	1	1
28	Población Santa Lacramarca	1	1
29	Población Viru	1	1
30	Usuarios Aguas Arriba de Chincas	3	4

**Cuadro 68:** Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica muy seca

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	47	92.17	26	55.32	270.47	5.08	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	43	92.83	24	55.81	377.61	0.96	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	42	93.00	23	54.76	33.32	0.96	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	13	97.83	7	53.85	19.68	1.09	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	15	97.50	8	53.33	24.84	1.12	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	15	97.50	8	53.33	26.59	1.12	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	14	97.67	8	57.14	15.08	1.06	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	42	93.00	23	54.76	42.79	0.95	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	87	85.50	49	56.32	449.11	3.73	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	77	87.17	33	42.86	813.87	5.22	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	42	93.00	23	54.76	60.51	0.97	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	13	97.83	7	53.85	6.40	1.08	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	95	84.17	50	52.63	763.68	3.77	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	43	92.83	24	55.81	79.98	0.99	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	98	83.67	51	52.04	890.37	6.16	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	46	92.33	25	54.35	99.78	7.04	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	94	84.33	46	48.94	249.01	7.90	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinescas	600	47	92.17	26	55.32	170.67	5.32	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable

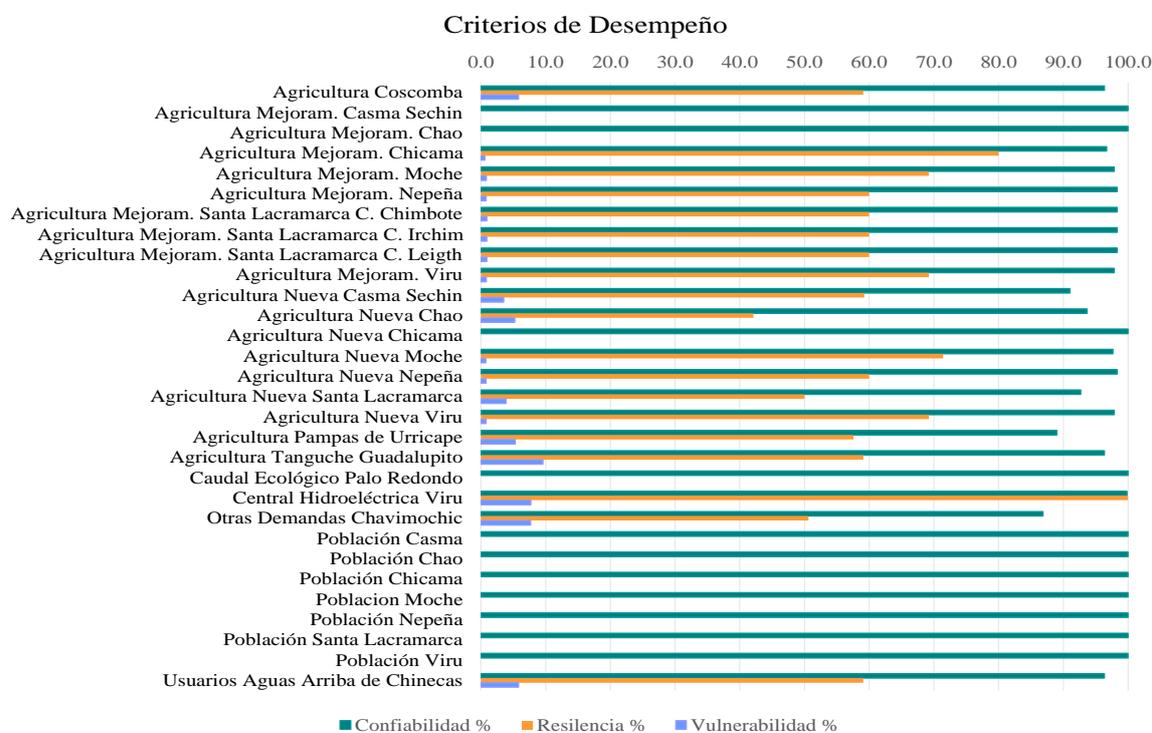


**Figura 65:** Criterios de desempeño condición hidrológica muy seca.

**Cuadro 69: Confiabilidad, Resiliencia, Vulnerabilidad y Volumen de Déficit para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, condición hidrológica seca**

N°	Usuarios	Total de Periodos	Periodos con Déficit	Confiabilidad (%)	Periodos regresando de un Déficit	Resiliencia (%)	Volumen de Déficit (Hm <sup>3</sup> )	Vulnerabilidad* (% V. Demanda)	Demanda (Hm <sup>3</sup> /año)
1	Agricultura Coscomba	600	22	96.33	13	59.09	144.49	5.80	113.30
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	62.24
3	Agricultura Mejoram. Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	73.08
4	Agricultura Mejoram. Chicama	600	20	96.67	16	80.00	108.38	0.59	910.77
5	Agricultura Mejoram. Moche	600	13	97.83	9	69.23	8.83	0.82	82.85
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	600	10	98.33	6	60.00	10.75	0.77	138.91
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	600	10	98.33	6	60.00	13.47	0.91	148.16
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	600	10	98.33	6	60.00	14.41	0.91	158.55
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	600	10	98.33	6	60.00	9.21	0.91	101.66
10	Agricultura Mejoram. Viru	600	13	97.83	9	69.23	11.42	0.82	107.38
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	600	54	91.00	32	59.26	262.64	3.52	138.37
12	Agricultura Nueva Chao	600	38	93.67	16	42.11	401.04	5.21	202.50
13	Agricultura Nueva Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	267.47
14	Agricultura Nueva Moche	600	14	97.67	10	71.43	15.59	0.75	148.50
15	Agricultura Nueva Nepeña	600	10	98.33	6	60.00	3.48	0.77	45.48
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	600	44	92.67	22	50.00	362.85	3.87	213.28
17	Agricultura Nueva Viru	600	13	97.83	9	69.23	19.02	0.78	187.90
18	Agricultura Pampas de Urricape	600	66	89.00	38	57.58	513.95	5.28	147.53
19	Agricultura Tanguche Guadalupito	600	22	96.33	13	59.09	64.87	9.56	30.83
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	15.79
21	Central Hidroeléctrica Viru	600	1	99.83	1	100.00	4.34	7.69	56.42
22	Otras Demandas Chavimochic	600	79	86.83	40	50.63	202.71	7.66	33.52
23	Población Casma	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	6.46
24	Población Chao	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
25	Población Chicama	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	21.31
26	Población Moche	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	132.47
27	Población Nepeña	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	1.79
28	Población Santa Lacramarca	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	102.08
29	Población Viru	600	0	100.00	0	N/A	0.00	N/A	5.35
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	600	22	96.33	13	59.09	86.87	5.78	68.29

\* Porcentajes obtenidos con respecto al volumen de demanda  
N/A: No Aplicable



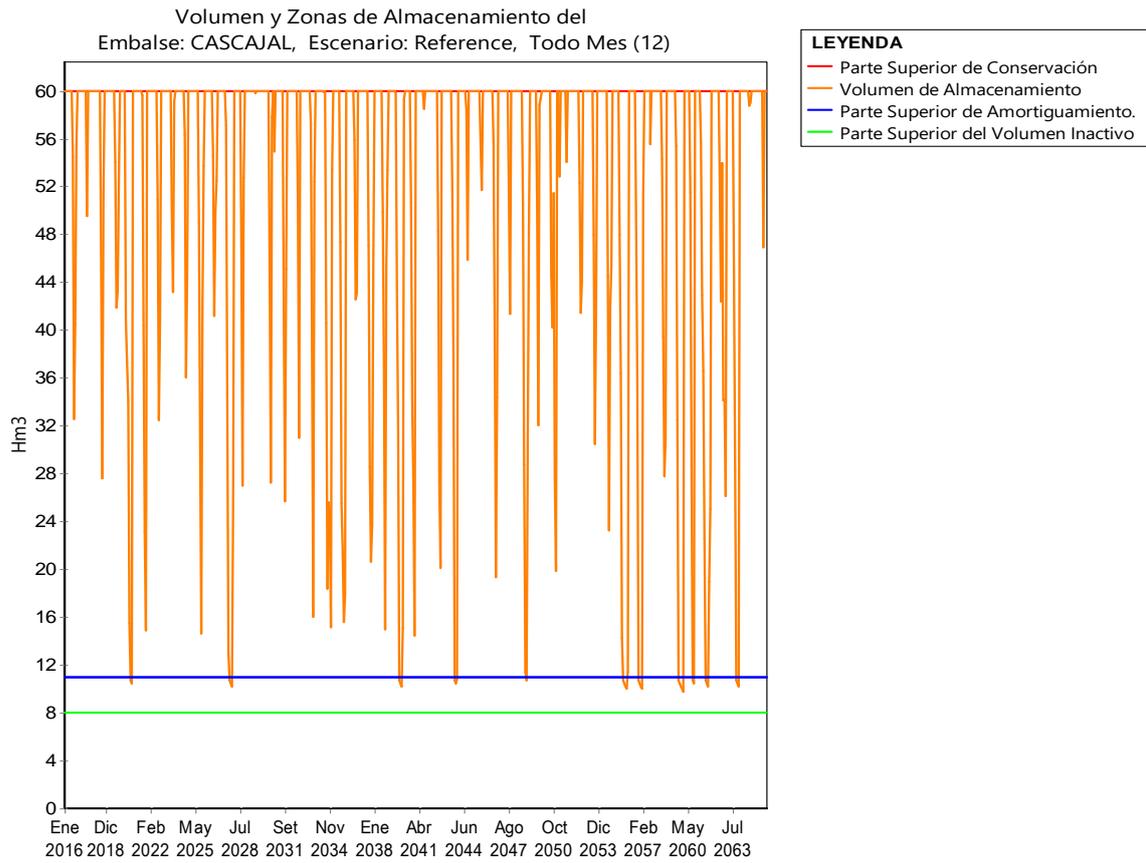
**Figura 66: Criterios de desempeño condición hidrológica seca.**

**Cuadro 70:** Resumen de los valores Confiabilidad para los usuarios que presentaron déficit en su extracción, para diferentes condiciones hidrológicas y diferentes formas de gestión

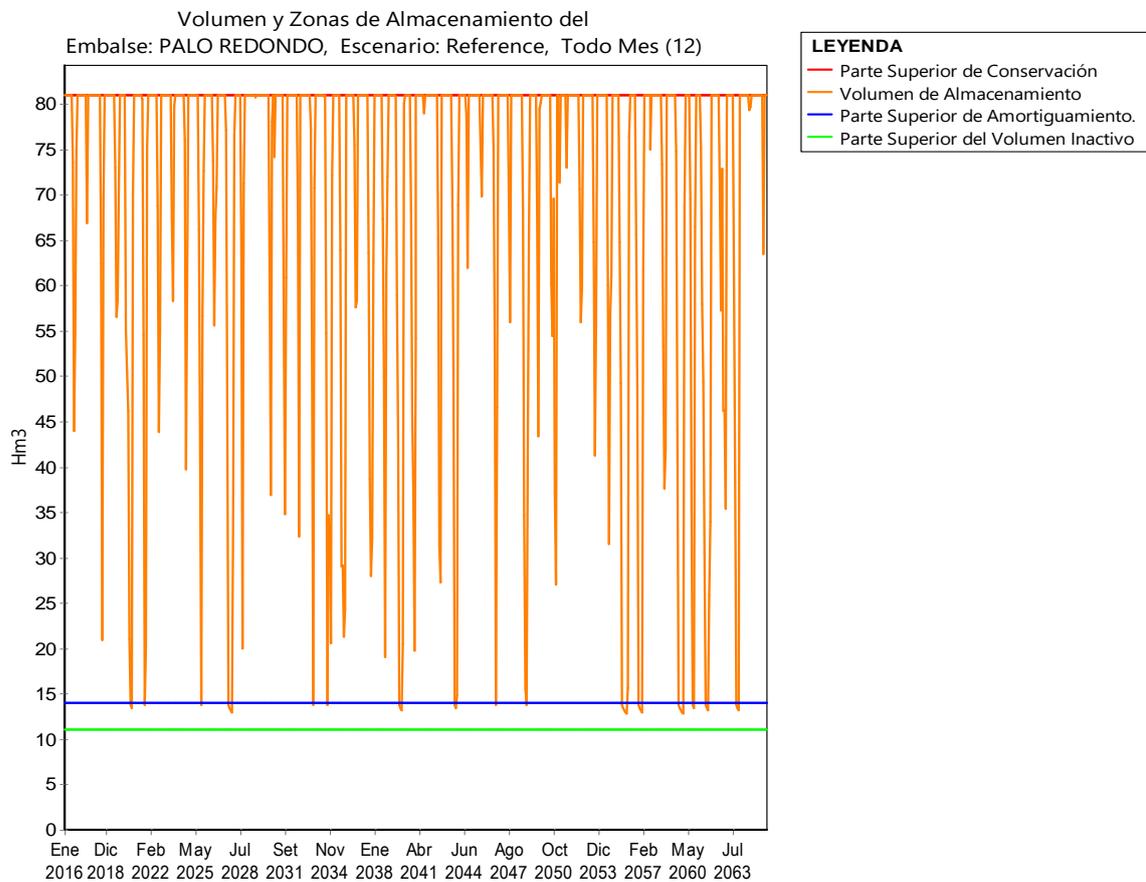
N°	Usuarios	Condición Hidrológica						
		Gestión muy seca	Muy seca	Gestión seca	Seca	Normal	Húmeda	Muy Húmeda
1	Agricultura Coscomba	92.17	96.83	96.33	98.17	99.50	99.67	99.50
2	Agricultura Mejoram. Casma Sechin	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3	Agricultura Mejoram. Chao	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4	Agricultura Mejoram. Chicama	92.83	100.00	96.67	99.83	100.00	100.00	100.00
5	Agricultura Mejoram. Moche	93.00	100.00	97.83	99.83	100.00	100.00	100.00
6	Agricultura Mejoram. Nepeña	97.83	100.00	98.33	99.83	100.00	100.00	100.00
7	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Chimbote	97.50	100.00	98.33	99.83	100.00	100.00	100.00
8	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Irchim	97.50	100.00	98.33	99.83	100.00	100.00	100.00
9	Agricultura Mejoram. Santa Lacramarca C. Leigh	97.67	100.00	98.33	99.83	100.00	100.00	100.00
10	Agricultura Mejoram. Viru	93.00	100.00	97.83	99.83	100.00	100.00	100.00
11	Agricultura Nueva Casma Sechin	85.50	93.83	91.00	95.50	98.17	98.67	98.50
12	Agricultura Nueva Chao	87.17	87.67	93.67	93.67	96.17	96.33	97.33
13	Agricultura Nueva Chicama	100.00	91.50	100.00	93.33	96.17	96.67	97.17
14	Agricultura Nueva Moche	93.00	80.67	97.67	90.67	94.17	94.50	95.00
15	Agricultura Nueva Nepeña	97.83	78.83	98.33	88.67	91.50	92.00	93.17
16	Agricultura Nueva Santa Lacramarca	84.17	84.83	92.67	93.00	95.50	96.33	96.50
17	Agricultura Nueva Viru	92.83	80.17	97.83	90.67	94.33	94.50	94.83
18	Agricultura Pampas de Urricape	83.67	91.50	89.00	93.33	96.17	96.67	97.17
19	Agricultura Tanguche Guadalupe	92.33	96.83	96.33	98.17	99.50	99.67	99.50
20	Caudal Ecológico Palo Redondo	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
21	Central Hidroeléctrica Viru	100.00	97.33	99.83	99.00	99.67	99.50	99.67
22	Otras Demandas Chavimochic	84.33	79.17	86.83	85.33	90.17	90.83	93.00
23	Población Casma	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
24	Población Chao	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	Población Chicama	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
26	Población Moche	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
27	Población Nepeña	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
28	Población Santa Lacramarca	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
29	Población Viru	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
30	Usuarios Aguas Arriba de Chinecas	92.17	100.00	96.33	100.00	100.00	100.00	100.00

**Cuadro 71:** Comparativo del almacenamiento en los reservorios Cascajal y Palo Redondo

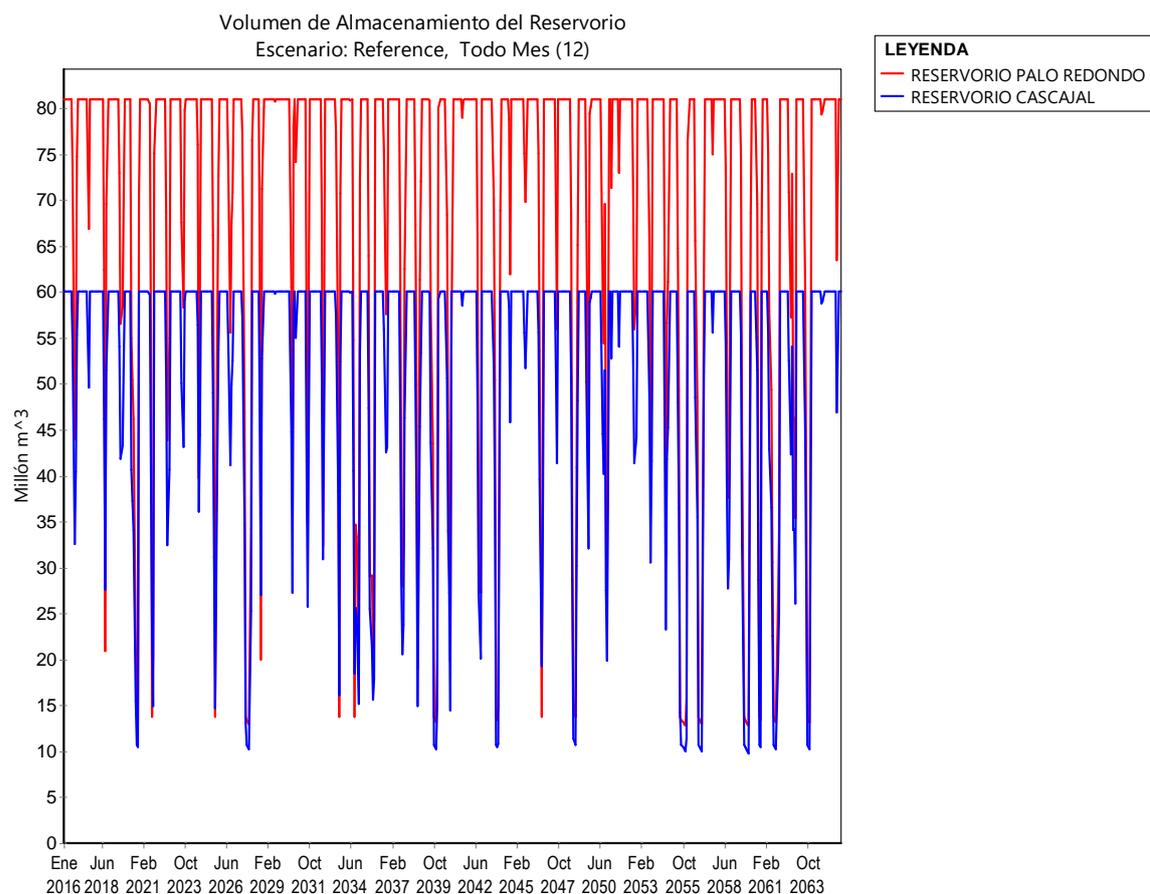
Reservorio / Condición Hidrológica	Volumen Mínimo (Hm <sup>3</sup> )	Volumen Útil (Hm <sup>3</sup> )	Nivel Mínimo (msnm)	Volumen Promedio (Hm <sup>3</sup> )	Volumen Útil (Hm <sup>3</sup> )	Nivel Promedio (msnm)	Volumen Máximo (Hm <sup>3</sup> )	Volumen Útil (Hm <sup>3</sup> )	Nivel Máximo (msnm)	Volumen Sedimento (Hm <sup>3</sup> )
<b>Muy seca</b>										
Reservorio Cascajal	9.59	1.59	277.50	46.77	38.77	293.23	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	12.59	1.59	273.22	62.48	51.48	296.47	81.00	70.00	303.20	11
<b>Seca</b>										
Reservorio Cascajal	9.77	1.77	277.64	51.74	43.74	295.08	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	12.77	1.77	273.41	69.45	58.45	299.20	81.00	70.00	303.20	11
<b>Normal</b>										
Reservorio Cascajal	9.97	1.97	277.79	52.90	44.90	295.54	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	12.77	1.77	273.41	71.04	60.04	299.85	81.00	70.00	303.20	11
<b>Húmeda</b>										
Reservorio Cascajal	9.97	1.97	277.79	52.84	44.84	295.53	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	12.97	1.97	273.62	70.88	59.88	299.85	81.00	70.00	303.20	11
<b>Muy húmeda</b>										
Reservorio Cascajal	10.43	2.43	278.15	54.19	46.19	296.04	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	13.43	2.43	274.10	72.78	61.78	300.55	81.00	70.00	303.20	11
<b>Acción 1: Muy seca</b>										
Reservorio Cascajal	9.59	1.59	277.50	46.66	38.66	293.18	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	12.59	1.59	273.22	62.29	51.29	296.38	81.00	70.00	303.20	11
<b>Acción 1: Seca</b>										
Reservorio Cascajal	9.77	1.77	277.64	51.74	43.74	295.08	60.00	52.00	297.91	8
Reservorio Palo Redondo	12.77	1.77	273.41	69.43	58.43	299.20	81.00	70.00	303.20	11



**Figura 67:** Volumen y zonas de almacenamiento Embalse Cascajal



**Figura 68:** Volumen y zonas de almacenamiento Embalse Palo Redondo.



**Figura 69:** Volumen de almacenamiento Embalse Cascajal y Palo Redondo.

#### 4.4.7 Resumen de resultados de los escenarios

El Escenario 1 representa la situación actual en donde las etapas I y II están concluidas, la explotación de aguas subterráneas actualmente es de 40.94 Hm<sup>3</sup> en Chavimochic y 19.52 Hm<sup>3</sup> en Chinecas, los resultados del criterio de desempeño del sistema como la confiabilidad están en el rango del 8.33% a 100% en la condición hidrológica normal, siendo los más afectados las áreas de poseionarios de Chinecas, es en este escenario en donde se realiza la calibración del modelo de gestión, dándonos valores de 0.22 a 0.38 en el criterio de eficiencia de Nash con los cuales se puede concluir como satisfactorios.

El Escenario 2 representa la situación futura en donde las etapas I, II y III están concluidas, con incremento de explotación de aguas subterráneas de 275.3 Hm<sup>3</sup> en Chavimochic y 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chinecas, los resultados del criterio de desempeño del sistema como la confiabilidad están en el rango del 63.50% a 100% en la condición hidrológica normal,

siendo los más afectados las áreas nuevas para la agricultura en los valles de Chao, Viru, Moche, Chicama en Chavimochic y las áreas nuevas para la agricultura en los valles Santa Lacramarca, Nepeña, Casma, Sechin en Chinecas.

El Escenario 3 representa la situación futura en donde las etapas I, II y III están concluidas, con incremento de explotación de aguas subterráneas de 410.3 Hm<sup>3</sup> en Chavimochic y 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chinecas, los resultados del criterio de desempeño del sistema como la confiabilidad aumentan y llegan a estar en el rango del 72.83% a 100%, siendo los más afectados las áreas nuevas para la agricultura en ambos proyectos.

El Escenario 4 representa la situación futura en donde las etapas I, II y III están concluidas, adicionalmente se proyectaran los embalses Palo redondo de 158 Hm<sup>3</sup> en Chavimochic y Cascajal de 52 Hm<sup>3</sup> en Chinecas, ambos volúmenes son útiles, la explotación subterránea va desde 275.3 a 451.74 Hm<sup>3</sup> en Chavimochic y 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chinecas, es en este escenario donde se utiliza la gestión de demandas con cambios en la distribución de prioridades y el aumento de la explotación subterránea, resultados indican un buen desempeño en el criterio de confiabilidad en la cual la condición hidrológica muy seca es la más crítica y en el rango del 81% a 100%, siendo los más afectados las áreas nuevas para la agricultura en ambos proyectos.

El Escenario 5 representa la situación futura en donde las etapas I, II y III están concluidas, adicionalmente se proyectaran los embalses Palo redondo de 70 Hm<sup>3</sup> en Chavimochic y Cascajal de 52 Hm<sup>3</sup> en Chinecas, ambos volúmenes son útiles, la explotación subterránea es de 451.74 Hm<sup>3</sup> en Chavimochic y 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chinecas, es en este escenario donde se utiliza la gestión de demandas con cambios en la distribución de prioridades, resultados indican un buen desempeño en el criterio de confiabilidad en la cual la condición hidrológica muy seca es la más crítica y en el rango del 80.17% a 100%, siendo los más afectados las áreas nuevas para la agricultura en ambos proyectos.

**Cuadro 72:** Resumen de escenarios de simulación de los recursos hídricos

Escenario	Proyecto	Valles Intervenidos	Año de simulación	Ofertas								Demanda no cubierta Condición Hidrológica					Gestión Acción 1 Condición Hidrológica		Gestión Acción 2 Condición Hidrológica	
				Aporte Superficial	Volumen explotación subterránea		Gestión Futura	Embalse	Volumen de Regulación			Secuencia 1 (Hm3)	Secuencia 3 (Hm3)	Secuencia 6 (Hm3)	Secuencia 9 (Hm3)	Secuencia 10 (Hm3)	Secuencia 1 (Hm3)	Secuencia 3 (Hm3)	Secuencia 1 (Hm3)	Secuencia 3 (Hm3)
					Actual (Hm3)	Futura (Hm3)			Volumen Útil Hm3	Volumen Muerto Hm3	Volumen Total Hm3									
1 Situación Actual	Chavimochic	Chao, Virú, Moche	2011 - 2015	Histórico	40.94	---	---	Palito Redondo	9	0.5	9.5	---	---	1154.65	---	---	---	---	---	---
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña		Histórico	19.52	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
2 Factibilidad	Chavimochic	Chao, Virú, Moche, Chicama	2016 - 2065	Sintético	---	275.3	---	---	---	---	---	---	---	7971.15	---	---	---	---	---	---
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña, Casma - Sechin		Sintético	---	271.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
3	Chavimochic	Chao, Virú, Moche, Chicama	2016 - 2065	Sintético	---	410.3	---	---	---	---	---	---	---	1324.03	---	---	---	---	---	---
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña, Casma - Sechin		Sintético	---	271.9	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
4	Chavimochic	Chao, Virú, Moche, Chicama	2016 - 2065	Sintético	---	275.3	451.74	Palo Redondo	158	24	182	5526.56	2929.43	1680.75	1291.52	1085.13	5367.86	2862.23	2688.18	1431.82
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña, Casma - Sechin		Sintético	---	271.9	271.9	Cascajal	52	8	60	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5	Chavimochic	Chao, Virú, Moche, Chicama	2016 - 2065	Sintético	---	451.74	---	Palo Redondo	70	11	81	4518.84	2322.86	1324.03	967.21	967.21	4393.78	2258.33	---	---
	Chinecas	Santa - Lacramarca, Nepeña, Casma - Sechin		Sintético	---	271.9	---	Cascajal	52	8	60	---	---	---	---	---	---	---	---	---

## 4.5 DISCUSIÓN

Según se ha expuesto en los capítulos anteriores como es el Análisis y tratamiento de la información Hidrométrica, los registros históricos muestran una recurrencia de los eventos el Niño los cuales han sido considerados dentro de la serie histórica para luego ser simulado estocásticamente, el análisis exploratorio, análisis homogenización y análisis de consistencia es importante ya que sin esta evaluación se incrementaría el grado de incertidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos, en tal sentido dos estaciones hidrométricas presentaron ligeros saltos en la media y la desviación estándar en donde los datos tabulados y los calculados difieren mínimamente, además que el inicio de este salto lo ubicamos en el año 1997 - 1998 que es el año del fenómeno el Niño de intensidad fuerte, en donde hubo daño a las estaciones hidrométricas estas dos estaciones son Quirihuac en Moche y San Jacinto en Nepeña.

La falta de información hidrométrica es recurrente en los ríos del Perú tal es el caso donde tenemos información escasa en los ríos Casma y Sechin con 29 años de registro, esta falta de información influye en los resultados de la simulación estocástica en donde la recomendación es generar una serie sintética de la misma longitud que la serie histórica.

En la simulación estocástica se asume que la serie a modelar debe ser estacionaria, al menos en media y la varianza si esta hipótesis no es satisfecha inicialmente, se debería realizar la estandarización en la media y varianza de la serie de tiempo, como es en este caso se normalizo y estandarizo las series históricas de los siete ríos que intervienen en la investigación. El ajuste del modelo no es más que la determinación de los parámetros del mismo, el enfoque utilizado para este estudio es el criterio de Akaike corregido que dice cuanto menores sean los valores del criterio, se entiende como más conveniente el modelo a ser usado, para el caso de la selección del modelo estocástico anual se analizaron 15 posibles ordenes (p, q), el modelo que mejor se ajusto es el ARMA (1,0) teniendo el valor menor de AICC 57.206, para el caso del modelo estocástico mensual el análisis fue el mismo como el anual, pero considerando los doce meses del año, la cual tuvimos modelos (1,0) con siete meses, los modelos (3,0) con dos meses, los modelos (0,3), (1,1) y (1,2) con un mes, lo factible hubiera sido trabajar con estos cinco modelos PARMA a nivel mensual, el desempeño hubiera sido mejor, pero en esta investigación se decidió trabajar con un solo modelo y es donde se encuentran la mayor parte de meses resaltados según el criterio de Akaike Corregido, este es el PARMA (1,0).

La capacidad de embalse calculado en SAMS por el método del rango reajustado está basado en el algoritmo de cresta secuencial que es equivalente al método de la curva de masa de Rippl, generando muestras sintéticas y determinando tantas capacidades de almacenamiento como series generadas se disponga, también determina la capacidad de almacenamiento para una longitud igual a la vida económica del proyecto y el sistema es tratado como proceso periódico estocástico. Este método fue usado en la tesis de maestría UNALM que lleva por nombre “Diseño de capacidad de embalses por el método experimental - Teoría del range” por ingeniero Máximo Villon Bejar, en donde determina las capacidades de embalse para los ríos Chancay – Huaral, Santa, Chicama y Jequetepeque. Un artículo realizado por los ingenieros Jaime Sánchez Tuya y Miguel Sánchez Delgado que lleva por nombre “Generación de series sintéticas mensuales del Río Chira mediante el uso de modelos markovianos” que tiene por objetivo generar series sintéticas medias mensuales del río Chira mediante el uso de modelos markovianos y luego determinar la capacidad de embalse óptimo, para lo cual se emplea el método Range, ya que la represa Poechos tiene actualmente una vida útil de 20 años aproximadamente y como alternativa de solución se propone el diseño de un embalse en la quebrada de San Francisco, ubicada en la cuenca del Río Chira.

En la simulación numérica del acuífero de Chao el trabajo realizado en el modelo conceptual ha sido bien sustentada identificando los afloramientos rocosos, los depósitos aluviales, coluviales, campos de arena y depósitos marinos, además de identificar napa freática que es predominantemente libre, siendo su fuente de alimentación las aguas que se infiltran en la parte alta de la cuenca, así como también las infiltraciones de las aguas provenientes del río Chorobal y Huamanzaña, de los canales de regadío y de las tierras de cultivo. La recarga de agua que viene de la parte alta de cuenca se consideró como una variación de acuerdo al nivel de almacenamiento ya que en el registro de las cargas desde el año 2001 hasta el 2007 tuvo una variación de 0.5m, esta recarga debería ser considerado independiente del nivel de almacenamiento porque depende de las condiciones climáticas en la cuenca alta, variaciones en la precipitación harían que el volumen de ingreso al acuífero disminuya o aumente.

Las áreas nuevas de riego en la parte alta que recargan al acuífero fueron consideradas en el modelo como franjas de recarga de un sector de área de riego, ya las áreas nuevas de riego no tienen niveles freáticos para su medición, por eso una vez concluida y puesta en

marcha las áreas nuevas de riego es recomendable implementar pozos de observación para poder llevar un mejor control de los niveles freáticos en dichos sectores.

La calibración se realizó con 57 pozos de observación desde el 2001 hasta el 2007 con 19 meses repartidos en este lapso de tiempo, hubiera sido óptimo la calibración hasta el año 2016 reduciendo ampliamente los rangos de errores.

La metodología aplicada fue tomada de forma similar al trabajo que realizó el ing. Guillermo Aguilar Giraldo en el “Modelo de Simulación de Flujo de Agua Subterránea - Acuífero Virú” realizado en el año 2008 y que fue incluido después en el estudio de Factibilidad del Proyecto Especial Chavimochic.

La simulación de los sistemas de recursos hídricos muestran que ante el incremento de la demanda, la generación de series sintéticas como oferta hídrica superficial y la oferta de agua subterránea la necesidad de implementar reservorios de regulación y una gestión de los recursos hídricos.

Para optimizar el sistema y cubrir las demandas a un límite mínimo del 90% de confiabilidad tuvimos que minimizar los volúmenes de los reservorios proyectados y aumentar los volúmenes de explotación del agua subterránea siempre y cuando garantizando el equilibrio entre la recarga y la descarga de los acuíferos.

Teniendo condiciones hidrológicas muy secas, secas, normal, húmedas y muy húmedas, el mejor escenario que tuvo un buen desempeño en satisfacción de demandas es el escenario 4 con acciones de gestión de demandas como uniformizar prioridades de distribución tanto para áreas de mejoramiento como para áreas nuevas (disminución de la confiabilidad en las demandas para áreas de mejoramiento), esto en la práctica se plasmaría en la reducción del volumen de agua enviado para cubrir las demandas prioritarias esto ayudara a reducir los impactos cuando haya déficit de agua en los usuarios con prioridades mayores, otra medida de gestión será una mayor explotación de aguas subterráneas, los volúmenes de almacenamiento son 158 Hm<sup>3</sup> en Palo Redondo y 52 Hm<sup>3</sup> en Cascajal.

## 4.6 PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

Tomando como referencia bibliográfica la investigación realizada por el SENAMHI en el año 2009, “Escenarios Climáticos en la Cuenca del Río Santa para el año 2030” el cual describe dos aspectos importantes del clima nacional: primero, las características del clima presente y las tendencias climáticas en los últimos 40 años, y en una segunda parte las proyecciones futuras hacia el año 2030 en base a los escenarios climáticos globales, haciendo uso de técnicas de regionalización dinámica y estadística para el escenario de emisión A2 (altas emisiones).

### **Primer aspecto: Tendencias Climáticas en los Últimos 40 años**

La tendencia de calentamiento observado en los últimos 40 años en la cuenca del río Santa, tanto en la temperatura máxima como en la temperatura mínima, explica la reducción de la cobertura glaciaria de la Cordillera Blanca, el glaciar tropical más extenso y alto del mundo (Morales Arnao 1998). La alta sensibilidad de los glaciares a la variabilidad climática permite inferir su alta vulnerabilidad frente al cambio climático, y bajo este contexto, la ocurrencia de eventos climáticos extremos como el ENOS, podrían condicionar su existencia, ya que estudios realizados por Vuille et al. (2007), demuestran que entre el 50 - 70% del incremento de la temperatura en los Andes, es atribuido a un incremento de la temperatura del Pacífico Tropical.

Para conocer las tendencias del clima en la cuenca del río Santa, se utilizaron datos totales diarios y mensuales de precipitación, así como temperaturas extremas diarias y medias mensuales, máximas y mínimas de la cuenca, para el período 1965 a 2006 (42 años), Recuay, Mollepata, Quiruvilca y Chiquián.

Según las Tendencias Climáticas en los últimos 40 años se determina que:

- Las temperaturas máxima y mínima en Recuay, muestran incrementos ligeros, principalmente posteriores a la década de 1980, mostrando alteraciones significativas durante los eventos cálidos del ENOS.
- La temperatura máxima en Chiquián ha aumentado hasta en 6 °C en los últimos 42 años. Mientras que la temperatura mínima muestra disminución. En ambos casos se muestran efectos significativos ante la ocurrencia de eventos ENOS.

- La influencia del ENOS presenta un patrón inverso entre las regiones norte y sur de la cuenca, es decir, los eventos cálidos son favorables para que ocurran sequías en la región sur, pero desfavorables para la región norte. Los periodos positivos del PDO son favorables para la no ocurrencia de sequías en toda la cuenca, particularmente para la región norte.
- La orografía de la cuenca determina un impacto diferenciado en la región norte y sur de la cuenca respecto a la ocurrencia de períodos secos. La inhibición o favorecimiento de lluvias en ambas regiones depende de la fase en la que se encuentren oscilaciones como la del ENOS y la PDO.

### **Segundo aspecto: Proyecciones del Cambio Climático al 2030**

Los Escenarios de Cambio Climático están basados en interpretaciones cualitativas de los Modelos de Circulación General (MCG), en las cuales se ha supuesto, para un determinado intervalo de tiempo futuro, un incremento en concentraciones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, los que modifican el comportamiento radiativo natural de la atmósfera (Nakicenovic y Swart 2000).

Según las Proyecciones del Cambio Climático al 2030 se determina que:

- La precipitación acumulada anual no presentaría mayores variaciones hacia el 2030 con respecto a la climatología actual.
- Estacionalmente, las lluvias se estarían incrementando en la cuenca alta hasta en un 15% en otoño.
- La temperatura máxima y mínima se incrementaría hasta en 0,55 °C en la cuenca, siendo la cuenca alta la que presentaría el mayor incremento de hasta 0,7 °C.
- Estacionalmente, otoño presentaría las mayores intensidades de calentamiento, principalmente en la cuenca alta.
- Las lluvias más fuertes estarían disminuyendo en intensidad hacia el 2030 y las temperaturas más intensas, incrementándose, pues las noches y días serían más cálidos hacia el 2030.

## V. CONCLUSIONES

- El modelo ARMA se ha utilizado para calcular la capacidad embalse de los reservorios y el análisis de sus propiedades anuales complejas como las sequías y almacenamiento.
- El modelo PARMA se ha utilizado el análisis de series hidrológicas estacionales, donde existe la necesidad de introducir las variaciones estacionales en el año hidrológico en la predicción de caudales en los ríos.
- Se generaron 1,000 series con escurrimientos sintéticos para la Estación Condorcero, cada una para un periodo de 50 años, de estas series se seleccionan cierto número de series (cinco) que representen diferentes condiciones hidrológicas (muy seco, seco, normal, húmedo, muy húmedo) y utilizar esta selección de series para evaluarlas en el modelo de planeación WEAP.
- La disponibilidad de los recursos hídricos superficiales de los ríos Chao, Virú, Moche, Chicama en Chavimochic es de 1136.37 Hm<sup>3</sup> anuales, mientras que en Chinecas los ríos Nepeña, Casma – Sechin es de 351.19 Hm<sup>3</sup> anuales, para el río Santa tenemos un volumen anual de 4408.57 Hm<sup>3</sup>, la disponibilidad superficial total de los ríos que intervienen el estudio es de 5896.10 Hm<sup>3</sup> anuales.
- El modelo calibrado en régimen transitorio ha sido empleado para simular escenarios de operación del acuífero Chao. Los criterios importantes durante la formulación de los escenarios fueron el incremento de la eficiencia de riego de 48.1% (situación actual) a 55%, mediante la implementación de sistemas de riego presurizado principalmente en el valle, y con eficiencias de riego de 85% para las áreas nuevas.
- Para la solución al problema de sales en la parte baja del valle de Chao, el quinto escenario constituye una de las mejores alternativas para la operación del sistema, en el cual se incrementa la eficiencia de riego en el valle de 48.1% a 55% y la implementación de 40 pozos de bombeo con 73.07MMC de explotación, con caudales medios de 57 l/s durante 18 horas por día y 365 días.
- El aumento en la explotación de aguas subterráneas de los siete acuíferos en estudio es viable si tomamos como referencia la explotación propuesta en el estudio de

factibilidad y perfil de ambos proyectos, un ejemplo claro de esto es el valle de Chao en donde la explotación puede llegar a 73 Hm<sup>3</sup> que es mucho mayor a los 20 Hm<sup>3</sup> propuestos en factibilidad.

- La oferta actual y futura de agua subterránea de los diferentes valles en el proyecto especial Chinecas es 19.52 Hm<sup>3</sup> y 271.90 Hm<sup>3</sup> respectivamente.
- En cuanto a la insatisfacción de demandas evaluadas a diferentes condiciones hidrológicas se tomó como primera medida de gestión implementar una restricción en los usos de riego y otros usos de tal manera de uniformizar los valores de prioridad tanto para mejoramiento como para de áreas nuevas, esto ayudara a reducir los impactos del déficit de agua en los usuarios con prioridades menores, la segunda medida fue el aumento de explotación de aguas subterráneas.
- El cuarto escenario simulado desde el año 2016 al 2065, es el que mejor desempeño tiene al cubrir las demandas ante las diferentes condiciones hidrológicas propuestas, las confiabilidades van 88.83% en el sitio de demanda Pampas de Urricape como única por debajo del 90% y con un 100% de confiabilidad en la demanda poblacional, para la satisfacción de estas demandas se proyectó el embalse Palo Redondo 158 Hm<sup>3</sup> de volumen útil en Chavimochic y en Cascajal un volumen útil de 52 Hm<sup>3</sup> que corresponde a Chinecas.
- Para condiciones hidrológicas secas y muy secas se adoptaron como medidas de gestión la variación de las prioridades de distribución la cual conllevara a uniformizar la confiabilidad del sistema no menor del 90% y en cuanto a la explotación de aguas subterráneas en Chavimochic se aumentara el volumen de explotación de 90 Hm<sup>3</sup> a 225 Hm<sup>3</sup> en Chao, Virú, Moche y de 185.3 Hm<sup>3</sup> a 226.74 Hm<sup>3</sup> en Chicama, la explotación de aguas subterráneas de 271.9 Hm<sup>3</sup> en Chinecas se mantendrá en los Valles de Santa - Lacramarca, Nepeña y Casma.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- Realizar los estudios de los acuíferos de cada valle en los Proyectos Chavimochic y Chinecas incluyendo la ampliación de las áreas agrícolas en los valles e intervalles darán como resultado los volúmenes explotables de los acuíferos. Conociendo los volúmenes ofertados para su explotación se pueden adoptar medidas a corto y mediano plazo, como por ejemplo aumentar la explotación de agua subterránea en épocas de sequía.
- Se recomienda nivelar los pozos de observación a fin de precisar los niveles freáticos observados, así como complementar la información de las conductividades hidráulicas con las recientes pruebas de bombeo realizados en el valle Chao.
- Con la puesta en funcionamiento del riego en las áreas nuevas se debe complementar mediante estudios hidrogeológicos toda esta área de influencia, las que deben contemplar la perforación de pozos exploratorios que permitan conocer el potencial de los acuíferos.
- Incentivar el cambio del tipo de riego por gravedad a riego presurizado en los valles antiguos así como también mejorar la eficiencia de conducción como la distribución, de esta manera mejorar la eficiencia del sistema.
- En los casos donde la confiabilidad tenga valores menores al 90% se puede restringir algunas demandas, por ejemplo las demandas de riego solo podría suministrarse un determinado volumen de recurso, así los agricultores podrían planificar la producción de productos según la cantidad de agua que tienen. Por otro lado también se podría reducir demandas menos prioritarias o una reducción ligera de las demandas prioritarias como por ejemplo la disminución de la prioridad de mejoramiento de riego, que su prioridad sea igual al de las áreas nuevas por irrigar, de tal manera que los agricultores de las áreas nuevas o sientan todo el impacto del déficit de oferta en condiciones hidrológicas muy secas.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, G. G. 2012. Flujo en Medios Porosos, Curso de Maestría en Recursos Hídricos, UNALM.
- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Trans: on Automatic Control. AS19 (6). 716-723.
- Aliaga, A. S. V. 1982. Notas del Curso de Hidrológica Avanzada para Post Grado. San José, Costa Rica.
- Aliaga A. S. V. 1985. Hidrológica Estadística. Lima - Perú.
- ANA - Autoridad Nacional del Agua. 1998. Inventario y Evaluación de las Fuentes de Agua Subterránea de Valle del Rio Chao. Lima - Perú. 1-109.
- ANA - Autoridad Nacional del Agua. 2010. Recursos Hídricos en el Perú. Lima - Perú. 1-372.
- Avilés, A. A. 2011. Análisis de los Sistemas de Recursos Hídricos en las Subcuencas de los ríos Tomebamba y Pindilig (Provincias Azuay y Cañar - Ecuador), Universidad Politécnica de Valencia. 1-161.
- Beach, J. 2006. Groundwater Availability Modeling (GAM), Groundwater Availability Models help Texas plan for the future. Government Engineering. 54-56.
- Bear, J. 1979. Hydraulics of groundwater, McGraw-Hill, New York. 356.
- Brockwell, P.J. and Davis, R.A. 1996. Introduction to Time Series and Forecasting. Springer Texts in Statistics, Springer-Verlag. 1.
- Centro de Cambio Global Universidad Católica de Chile - Stockholm Environment Institute. 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. 1-86.

- Cryer, J. D., Chan, K. 2008. Time Series Analysis with applications in R. New York, Springer. 2.
- Custodio, E., Llamas, M.R. 1996. Hidrología subterránea. Omega, Barcelona. 1.
- Fernández, T. M. A. 2004. Estudio y modelización de la contaminación del acuífero del río Najerilla. Aplicación de la microextracción en fase sólida para la determinación de los contaminantes. Tesis Doctoral, Universidad de La Rioja. 1-481.
- Frevert, D.K., Cowan, M.S., and Lane W.L. 1989. Use of Stochastic Hydrology in Reservoir Operation, J. Irrig. Drain. Eng. 115 (3). 334-343.
- Hurvich, C. M. and Tsai, C. L. 1989. Regression and time series model selection in small samples. Biometrika, 76(2). 297–307.
- Hurvich, C.M. and Tsai, C.-L. 1993. A corrected Akaike information criterion for vector autoregressive model selection. J. Time Series Anal. 14. 271–279.
- INADE – Instituto Nacional de Desarrollo. 2002. Plan de Gestión de la Oferta de Agua en la Cuenca de Gestión Santa, Proyectos Especiales Chavimochic y Chincas, Balance de Oferta – Demanda de Agua. 2.
- Ingol-Blanco, E and McKinney, D.C. (2013). Development of a Hydrological Model for the Rio Conchos Basin. Journal of Hydrologic Engineering, Volume 18, ASCE.
- Lane, W.L., and Frevert D.K. 1990. Applied Stochastic Techniques, personal computer versión 5.2, users manual, Bureau of Reclamation, U.S. Dep. of Interior, Denver, Colorado.
- Liu, D. H. F, Lipták, B. G. 2000. Groundwater and surface water pollution. Lewis Publishers, New York.
- Loucks, D.P., Stedinger J.R., and Haith D.A. 1981. Water Resources Systems Planning and Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

- McKinney, D. C., Sandoval, S. S. and Teasley, R. L. 2008. Escenarios De Manejo Del Agua Para La Cuenca Del Rio Grande/Bravo. Center for Research in Water Resourc - University of Texas at Austin. 8 (1). 1-286.
- Morales-Arno, B. 1998. Glaciers of Peru. In: Williams, R.S., Jr., and Ferrigno, J.G., eds., Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: U.S. Geological Survey Professional Paper 1386 (Glaciers of South America).
- Nakicenovic, N. and Swart, R. 2000. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 599 p.
- P.E. Chavimochic. 2010. Estudio de Factibilidad Proyecto Chavimochic Tercera Etapa. Región La Libertad – Perú.
- P.E. Chavimochic. 2012. Chavimochic en Cifras 2000 – 2010. Región La Libertad – Perú.
- P.E. Chincas 2011. Actualización de la Eficiencia de Riego del Valle de Santa - Lacramarca, Región Ancash - Perú.
- P.E. Chincas. 2012. Adecuación del Proyecto Original Chincas al Esquema Reestructurado, Región Ancash - Perú.
- Rodríguez, T. D. 2012. Disponibilidad del Agua y Riesgo Hidrológico en Los Ecurrimientos de la Cuenca Del Río Copalita, Con Un Modelo Estocástico. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional. 1-130.
- Salas De la Cruz, J. 1979. Modelamiento Estocástico de Series Hidrológicas. Publidrat. 67.
- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V. y Lane, W. L. 1980. Applied modeling of hydrologic time series. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Salas, J.D. 1993. Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series. Handbook of Hydrology - McGraw-Hill. 19.
- Schwartz, F. W., and Zhang, H. 2003. Fundamentals of groundwater. 1-583.

- SENAMHI – Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. 2009. Escenarios Climáticos en la Cuenca del Rio Santa para el año 2030. Lima - Perú.
- Shumway, R.H. and Stoffer, D.S. 2000. Time Series Analysis and Its Applications. Springer Texts in Statistics, Springer-Verlag, 1.
- Sveinsson, O. G. B., Salas, J. D., Lane, W. L., and Frevert, D. K. 2009. Stochastic analysis modeling and simulation (SAMS) - Version 2009 - User's Manual, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Todd, D. K. and Mays, L. W. 2005. Groundwater hydrology. Ed. John Wiley & Sons, INC. 1-636.
- Vuille, M., 2007: Climate change in the Tropical Andes – Impacts and consequences for glaciation and water resources. Part I, II and III. A report for CONAM and the World Bank.
- Waterloo Hydrogeologic. 2002. Visual MODFLOW User's Manual, Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo. Ontario.

## VIII. ANEXOS

### Anexo 1: Análisis de Datos Estadísticos

#### Estadísticas básicas de las series

**Cuadro 73:** Estadísticas básicas serie histórica mensual estación

Chorobal - Huamanzaña m<sup>3</sup>/s

Mes	media	Desv. estandar	Coef. variacion	sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	0.6269	1.352	2.1569	4.783	0	9.16	-0.0119	-0.0392
Febrero	1.928	5.312	2.7557	5.3433	0	36.12	0.3521	-0.0266
Marzo	5.147	6.592	1.2809	2.1223	0	32.54	0.101	0.1828
Abril	2.076	2.726	1.3131	2.2383	0	14.3	0.301	0.4165
Mayo	0.2453	0.5118	2.0866	4.4695	0	3.4	0.1265	0.2126
Junio	0.06127	0.1815	2.963	4.8631	0	1.19	-0.0103	-0.0359
Julio	0.1529	0.9394	6.1435	7.1614	0	7.04	-0.0255	-0.0256
Agosto	0.03	0.0966	3.2199	5.0532	0	0.65	0.0162	-0.0286
Setiembre	0.01436	0.04434	3.0873	3.6784	0	0.25	0.2249	0.0409
Octubre	0.016	0.04547	2.842	4.6568	0	0.3	0.0463	0.015
Noviembre	0.01582	0.04861	3.0728	4.4408	0	0.31	0.0538	-0.0813
Diciembre	0.03418	0.1218	3.5637	5.5006	0	0.84	-0.0467	-0.0445

**Cuadro 74:** Estadísticas básicas serie histórica mensual estación

Huacapongo – Sifón Viru en m<sup>3</sup>/s

Mes	media	Desv. estandar	Coef. variacion	sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	3.953	5.332	1.3489	2.6211	0.04	27.81	-0.1543	-0.0238
Febrero	8.534	9.445	1.1067	2.0624	0.04	50.51	-0.1009	-0.0866
Marzo	14.38	19.15	1.3316	3.9482	0.11	129.1	-0.0846	-0.006
Abril	7.964	6.961	0.874	1.3832	0.17	35.27	-0.0354	0.031
Mayo	1.871	1.655	0.8845	1.9229	0.01	8.98	0.0815	0.0393
Junio	0.6321	1.253	1.982	6.1992	0.01	9.68	-0.0402	-0.0111
Julio	0.2079	0.2123	1.0216	2.7535	0.01	1.34	0.3402	0.3761
Agosto	0.108	0.1261	1.1676	3.061	0	0.8	0.5278	0.483
Setiembre	0.08164	0.1053	1.2893	2.5035	0	0.57	0.481	0.4813
Octubre	0.3346	0.4962	1.4831	3.221	0	3.1	0.161	0.0604
Noviembre	0.6633	0.8796	1.3262	1.9402	0	4.19	-0.1789	0.0437
Diciembre	1.588	2.471	1.5563	2.9918	0	14.85	-0.1106	-0.0179

**Cuadro 75:** Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Quirihuc – Moche m<sup>3</sup>/s

Mes	media	Desv. estandar	Coef. variacion	sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	8.932	10.26	1.1484	2.7594	0.12	63.56	-0.0976	-0.0709
Febrero	19.19	21.68	1.1299	2.6313	0.22	121.2	0.0261	-0.0341
Marzo	30.17	30.12	0.9982	3.7615	1.16	213.1	-0.071	0.0555
Abril	23.75	16.7	0.7031	0.932	2.34	67.23	0.1114	0.0916
Mayo	8.248	6.856	0.8312	1.951	0.29	32.75	0.2478	0.1442
Junio	2.332	2.033	0.8716	1.4382	0.1	8.74	0.4424	0.1695
Julio	0.9508	1.04	1.0935	2.0165	0.01	4.55	0.5366	0.3382
Agosto	0.4846	0.5083	1.0489	1.9358	0	2.35	0.5821	0.4048
Setiembre	0.5718	0.777	1.3588	2.4182	0	3.47	0.3604	0.3396
Octubre	1.744	1.793	1.028	1.6569	0	8.65	0.005	0.0168
Noviembre	2.758	2.664	0.9662	1.3803	0	12.26	-0.1232	-0.053
Diciembre	4.573	5.758	1.2589	2.8557	0	33.98	-0.0985	0.1389

**Cuadro 76:** Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Salinar - Tambo en m<sup>3</sup>/s

Mes	media	Desv. estandar	Coef. variacion	sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	19.33	21.17	1.0953	3.535	0.75	144.8	-0.1329	-0.0454
Febrero	50.86	58.34	1.1471	3.5709	0.91	390.9	0.0097	-0.0448
Marzo	87.49	94.08	1.0753	4.4136	2.32	694.8	-0.0582	0.157
Abril	62.45	54.34	0.8701	2.2577	5.87	300.3	-0.0601	0.0544
Mayo	23.39	19.37	0.8281	3.3123	1.03	134.3	0.1641	-0.0598
Junio	9.376	5.314	0.5667	1.0748	0.72	29.66	0.3469	0.0091
Julio	5.488	2.954	0.5383	0.4145	0.54	12.21	0.4118	0.109
Agosto	3.517	1.967	0.5592	0.1119	0.28	7.69	0.449	0.2172
Setiembre	2.908	1.844	0.6342	0.4464	0.15	7.01	0.4605	0.2845
Octubre	3.851	2.598	0.6748	1.4224	0.42	14.7	0.2184	0.1735
Noviembre	4.966	3.296	0.6638	1.1792	0.73	16.52	-0.0765	-0.1024
Diciembre	7.961	7.481	0.9397	2.4335	0.56	45.7	-0.1076	0.1585

**Cuadro 77:** Estadísticas básicas serie histórica mensual estación San Jacinto en m<sup>3</sup>/s

Mes	media	Desv. estandar	Coef. variacion	sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	3.63	4.971	1.3694	2.1281	0.03	23.45	-0.048	-0.0839
Febrero	9.378	13.09	1.3964	2.6635	0.01	66.97	0.2657	0.1196
Marzo	13.58	17.22	1.2681	2.3778	0.07	80.86	0.0434	0.076
Abril	6.897	11.88	1.7218	4.1995	0	72.77	-0.0318	-0.0125
Mayo	2.571	4.049	1.5752	2.7118	0	21.3	0.0595	0.0715
Junio	0.8469	1.492	1.7614	3.75	0	8.73	0.0635	-0.01
Julio	0.4229	0.5215	1.2333	2.5775	0	2.77	0.1069	-0.0822
Agosto	0.2905	0.3186	1.0968	1.6202	0	1.35	0.2208	0.0359
Setiembre	0.1819	0.1864	1.0248	1.6431	0	0.81	0.1381	0.1956
Octubre	0.386	0.6768	1.7536	2.7645	0	3.15	0.2191	-0.225
Noviembre	0.34	0.5322	1.5653	3.1101	0	2.92	0.0794	-0.1547
Diciembre	1.101	1.631	1.4804	2.6547	0	8.73	-0.0687	0.1298

**Cuadro 78:** Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Sector Tutuma en m<sup>3</sup>/s

Mes	media	Desv. estandar	Coef. variacion	sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	8.832	13.95	1.5792	4.1436	0.06	77.91	-0.0861	0.1084
Febrero	16.34	17.32	1.06	2.7781	0.36	91.29	0.1145	0.1504
Marzo	20.2	15.06	0.7458	1.2924	1.62	68.03	-0.3981	0.5002
Abril	13.59	10.6	0.7799	1.5123	0.81	46.77	-0.2372	0.0969
Mayo	5.112	3.5	0.6846	0.5825	0	12.29	0.0154	0.0028
Junio	2.489	2.025	0.8135	0.428	0	6.19	0.1609	0.1397
Julio	1.438	1.474	1.0254	0.8276	0	4.59	0.1517	0.1004
Agosto	0.7424	0.8609	1.1596	1.0236	0	2.61	0.2146	0.1326
Setiembre	0.3479	0.4762	1.3687	2.1368	0	2.22	0.2968	0.1171
Octubre	1.186	2.042	1.7218	2.2818	0	8.55	-0.1728	-0.2108
Noviembre	1.583	2.371	1.4974	1.844	0	9.47	-0.156	-0.0198
Diciembre	3.943	5.266	1.3357	1.7174	0	19.32	-0.2526	0.0374

**Cuadro 79:** Estadísticas básicas serie histórica mensual estación Puente Quillo en m<sup>3</sup>/s

Mes	media	Desv. estandar	Coef. variacion	sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	1.811	2.228	1.2305	2.0112	0	10.18	-0.1008	0.1401
Febrero	4.633	5.226	1.1278	2.0356	0	24	0.2973	0.136
Marzo	5.682	4.697	0.8266	1.0586	0.02	20.16	-0.2209	0.1143
Abril	3.835	4.09	1.0666	2.5758	0	20.6	-0.1638	-0.051
Mayo	1.289	0.9937	0.7712	0.8939	0	3.85	0.1294	-0.024
Junio	0.5293	0.6394	1.208	2.277	0	3.11	0.1467	0.0508
Julio	0.2721	0.369	1.3564	2.1588	0	1.71	0.4386	0.0489
Agosto	0.1417	0.2191	1.5458	2.3299	0	1.01	0.4286	0.1858
Setiembre	0.08897	0.1382	1.5537	1.385	0	0.51	0.2593	0.1667
Octubre	0.2121	0.3428	1.6164	2.7782	0	1.67	-0.183	-0.1237
Noviembre	0.3	0.5119	1.7062	2.3475	0	2.01	-0.1098	-0.0719
Diciembre	0.8303	1.275	1.535	2.467	0	5.46	-0.0364	-0.0551

## Anexo 2: Simulación Estocástica

### Modelo de series de tiempo

#### Modelo autoregresivo de media móvil periódico (PARMA)

**Cuadro 80:** Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Estación Chorobal - Huamanzaña

MES	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
	AICC														
1	59.218	60.789	60.586	59.036	53.811	60.47	60.135	59.538	60.271	62.638	60.551	61.559	57.102	60.693	60.865
2	25.027	21.611	21.273	23.206	27.127	22.89	26.546	21.355	27.163	22.646	20.924	13.767	20.508	19.579	23.462
3	18.908	21.137	22.244	42.05	18.998	14.269	20.819	16.536	16.046	18.624	23.538	19.567	22.752	22.835	21.307
4	-11.13	-15.52	-19.3	14.857	29.172	-18.42	-16.76	-12.68	-17.05	-16.15	-16.87	-18.64	-18.94	-17.5	-23.6
5	24.676	26.303	20.135	39.461	35.336	52.203	26.664	22.114	21.881	23.178	22.89	23.525	21.457	23.009	23.878
6	45.322	43.789	43.452	45.606	39.689	47.41	44.516	44.093	46.72	45.373	46.798	47.091	44.583	47.266	47.328
7	5.31	6.296	8.488	26.699	5.941	8.032	6.132	9.798	9.384	6.726	9.947	11.681	10.757	8.74	12.555
8	59.179	58.636	57.944	56.596	54.754	57.16	56.87	56.564	50.136	56.762	53.283	50.99	55.094	60.727	53.22
9	29.547	31.689	33.599	30.791	32.958	33.543	31.488	33.638	36.318	33.942	35.757	37.194	35.887	35.694	38.164
10	54.306	55.806	58.108	54.496	56.266	58.339	55.816	58.105	60.434	58.135	58.371	61.209	60.489	61.121	65.096
11	-78.43	-80.58	-78.27	-56.68	-74.11	-78.53	-79.86	-76.83	-75.99	-78.27	-76.83	-77.36	-76.79	-76.65	-74.76
12	27.223	27.85	30.026	57.14	25.981	26.259	28.687	27.808	27.967	29.865	31.77	26.277	31.318	30.297	24.17

**Cuadro 81:** Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos PARMA – Estación Huacapongo - Sifón Virú

MES	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC
1	54.330	54.105	56.37	54.016	54.210	56.049	54.123	56.427	58.145	56.364	58.648	60.762	58.646	61.064	62.488
2	51.571	53.635	55.748	54.643	53.436	55.121	53.769	55.587	57.389	55.753	57.088	58.706	58.104	59.289	62.648
3	38.312	38.801	40.696	47.592	41.650	40.852	38.827	41.553	42.436	40.112	43.064	44.857	42.213	44.69	46.952
4	21.544	22.769	22.356	26.781	32.927	27.274	23.489	21.847	24.484	24.631	22.071	27.176	22.723	25.65	28.082
5	44.435	46.643	44.772	49.886	48.971	50.652	46.632	43.490	46.034	46.954	44.594	47.691	44.993	46.355	49.721
6	28.427	26.051	25.98	39.966	35.498	35.469	26.244	22.103	22.393	27.790	23.352	21.887	27.558	30.118	28.081
7	-2.696	-0.687	1.606	28.206	15.521	7.630	-0.673	0.492	0.424	1.473	1.414	4.159	1.096	1.29	4.545
8	-7.950	-11.798	-9.511	23.829	9.181	-4.960	-11.644	-9.819	-6.280	-9.733	-7.276	-5.049	-7.175	-6.155	-3.541
9	8.045	9.627	10.589	46.521	26.574	19.306	8.939	10.107	10.668	10.731	10.777	11.718	7.931	8.447	12.202
10	36.425	38.628	39.473	43.137	51.711	41.206	38.593	40.789	38.190	40.499	39.584	41.452	38.783	38.941	41.022
11	44.441	46.456	48.7	52.722	46.820	56.267	46.467	48.718	49.756	46.710	46.322	41.891	49.096	42.855	52.989
12	39.841	41.226	43.49	42.384	41.051	43.292	41.213	43.575	43.739	43.417	41.382	45.463	42.292	36.95	40.51

**Cuadro 82:** Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos

## PARMA – Estación Quirihuc – Moche

MES	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
	AICC														
1	44.198	46.409	48.481	54.212	45.715	43.298	46.348	47.712	49.69	48.536	49.277	50.949	50.515	51.06	52.057
2	39.203	40.572	42.785	43.303	39.415	41.41	40.498	41.719	43.383	42.219	44.174	44.432	45.027	42.757	47.207
3	35.698	34.806	37.096	51.576	38.526	36.079	34.879	36.656	38.2	36.218	38.891	40.491	39.456	40.332	40.803
4	16.27	18.064	18.01	22.837	37.922	25.663	18.481	16.352	17.427	18.186	17.337	18.12	18.55	19.804	21.326
5	20.844	22.789	19.144	42.177	20.907	42.42	22.759	16.148	21.537	24.805	19.781	18.161	18.934	20.395	20.102
6	-2.823	-1.948	-8.422	20.757	15.784	5.535	-1.373	-7.013	-4.843	-2.116	-5.907	-2.426	-8.166	-3.869	-3.558
7	-47.12	-44.91	-42.62	28.439	14.135	-28.72	-44.91	-43.05	-40.92	-42.69	-41.34	-39.7	-40.46	-39.16	-40.12
8	-78.97	-80.65	-79.64	19.819	-9.487	-32.74	-80.68	-78.11	-77.43	-78.41	-77.56	-76.74	-79.82	-77.28	-77.51
9	-21.84	-19.67	-18.35	37.132	26.481	23.377	-19.83	-18.36	-16.04	-18.44	-16.05	-13.37	-15.99	-14.02	-14.52
10	47.844	49.924	52.147	53.707	58.323	55.924	49.953	51.954	52.457	50.267	52.756	54.955	52.539	54.818	57.434
11	31.87	32.312	33.565	30.936	30.361	35.852	32.53	33.977	35.264	34.144	35.214	38.11	35.481	37.724	40.566
12	42.244	41.658	43.611	49.453	42.234	42.738	41.311	43.604	45.321	43.947	43.942	46.851	44.624	47.682	48.892

**Cuadro 83:** Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos

## PARMA – Estación Salinar – Tambo

MES	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
	AICC														
1	40.973	42.946	44.42	55.052	42.553	41.16	42.344	43.964	44.749	43.912	45.16	43.734	46.482	46.775	45.907
2	31.987	34.199	36.458	40.545	37.682	35.644	34.191	35.553	37.188	35.45	35.974	38.916	36.312	38.575	43.184
3	21.324	23.443	24.531	38.148	34.268	28.165	23.454	24.539	26.585	24.839	26.913	27.802	26.704	28.249	32.136
4	4.498	6.57	5.967	25.731	23.169	23.339	6.629	5.291	7.379	8.115	8.63	9.248	8.335	10.793	10.734
5	-24.74	-24.12	-25.47	31.419	3.034	5.919	-23.9	-26.19	-24.02	-21.85	-25.22	-23.23	-23.34	-22.86	-25.23
6	-57.65	-58.33	-69.56	16.237	19.854	-13.3	-60.59	-73.25	-72.17	-70.11	-74.67	-71.02	-70.06	-70.88	-72.29
7	-101.1	-100.6	-98.34	28.6	-8.317	-8.865	-100.1	-98.53	-98.06	-99.53	-98.55	-99.27	-100.1	-96.73	-99.25
8	-114.7	-113.4	-111.8	13.997	-17.28	-28.49	-113.8	-114.3	-114.5	-112.2	-114.1	-112	-110.3	-117.1	-117.1
9	-107.6	-105.7	-104.1	35.634	30.781	-7.751	-105.9	-104.6	-106	-103.5	-103.5	-104.8	-105.2	-99.6	-100.3
10	6.168	8.358	10.404	40.7	29.086	38.696	8.372	10.608	12.435	10.568	12.912	14.31	12.592	14.865	16.284
11	43.008	43.723	42.398	34.966	41.756	38.932	43.791	42.843	42.237	45.982	42.738	43.407	40.28	42.498	45.903
12	37.78	36.32	36.089	41.591	35.01	42.082	34.824	35.701	38.527	36.643	38.366	35.636	36.856	36.05	36.632

**Cuadro 84:** Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos

## PARMA – Estación San Jacinto

MES	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC
1	33.473	35.776	32.854	42.657	26.978	27.391	35.395	33.145	32.298	29.612	33.574	34.784	35.264	59.094	39.129
2	28.248	30.518	32.543	30.624	35.195	33.219	30.560	32.759	35.516	33.035	35.346	37.642	35.113	37.661	40.429
3	21.703	23.023	22.457	33.301	29.763	34.911	22.928	17.908	19.506	15.896	21.646	22.768	24.914	43.288	25.615
4	-1.110	0.969	1.884	15.725	3.566	10.267	0.599	-0.316	0.305	-1.741	-1.51	2.919	3.342	7.043	6.309
5	-16.653	-15.082	-13.342	30.072	9.209	-1.699	-15.423	-14.356	-11.111	-12.59	-10.58	-14.7	-13.47	-13.84	-15.59
6	-20.753	-22.538	-24.375	10.005	27.342	-9.295	-24.029	-25.596	-23.997	-25.28	-23.41	-21.02	-23.48	-10.81	-19.01
7	-19.647	-18.735	-16.293	34.850	0.887	30.432	-18.841	-17.550	-15.998	-17.41	-15.48	-13.18	-16.08	-16.91	-13.15
8	-31.180	-30.282	-47.169	10.471	-7.647	-27.936	-28.933	-51.224	-46.634	-46.75	-49.21	-48.53	-46.22	-45.57	-46.07
9	-35.644	-33.878	-33.299	25.764	34.651	-20.639	-33.768	-35.864	-34.537	-33.46	-35.28	-33.41	-32.54	-29.05	-30.28
10	38.101	40.358	42.686	38.262	39.448	41.462	40.376	40.733	43.253	41.394	43.762	43.637	42.773	47.277	47.144
11	10.718	12.837	13.887	19.952	12.888	16.365	12.919	12.832	13.663	15.217	15.048	15.732	13.4	14.273	19.699
12	25.281	25.757	28.009	32.124	26.408	19.886	25.720	25.415	24.018	27.972	23.286	26.561	28.774	30.115	28.01

**Cuadro 85:** Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos  
PARMA – Estación Sector Tutuma

MES	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC	AICC
1	22.353	20.703	23.192	19.489	19.640	22.211	21.283	22.025	25.131	23.423	25.019	29.187	22.852	27.162	38.496
2	9.984	11.221	13.323	25.225	10.201	12.875	10.606	11.296	14.360	13.331	14.624	15.19	14.207	17.042	22.611
3	16.203	18.698	21.404	21.347	26.260	21.441	18.701	21.398	24.266	21.398	24.168	25.797	23.087	25.032	31.103
4	8.821	11.237	11.509	16.923	18.331	18.010	11.241	13.134	12.704	12.306	13.792	12.946	12.336	17.207	20.277
5	17.32	18.733	18.542	23.831	23.438	25.469	18.486	19.355	21.117	21.176	21.125	22.741	21.478	24.68	22.102
6	-4.657	-2.560	0.124	18.124	7.986	8.389	-2.513	-1.742	-0.374	0.064	-2.062	2.362	-1.414	1.501	5.865
7	-3.98	-2.490	-0.790	12.779	4.403	0.380	-2.141	-1.350	1.838	-0.058	1.184	4.803	2.148	3.084	6.361
8	-20.46	-18.936	-19.364	17.884	-3.028	-8.596	-18.425	-17.316	-17.076	-17.517	-16.228	-13.57	-16.42	-15.11	-12.65
9	3.843	1.582	2.621	16.317	21.500	11.176	1.055	-1.083	2.291	2.315	4.380	1.484	3.237	2.711	8.412
10	26.576	27.618	29.971	23.657	29.963	26.707	28.399	28.836	31.740	29.317	30.931	33.678	31.653	33.884	37.254
11	12.503	14.720	14.926	22.818	15.713	17.295	15.001	15.236	18.529	16.780	15.953	19.252	17.168	20.054	22.73
12	23.258	25.381	24.067	30.888	23.553	23.881	25.380	25.136	27.435	24.797	28.169	30.028	26.937	29.551	30.167

**Cuadro 86:** Valores del criterio de información de Akaike corregido – AICC – Modelos  
PARMA – Estación Puente Quillo

MES	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
	AICC														
1	13.172	14.482	16.651	12.826	16.526	19.636	14.976	16.328	17.68	16.991	18.064	20.836	19.542	22.667	24.846
2	19.397	20.48	22.353	29.541	22.268	25.616	20.993	23.953	25.659	23.116	26.013	28.111	25.249	28.2	31.529
3	20.919	22.363	25.031	25.44	26.671	24.696	22.595	24.885	26.462	24.755	26.634	30.207	27.395	32.177	33.027
4	8.268	10.129	11.206	17.233	19.762	15.922	9.76	11.292	11.972	12.563	15.427	13.011	13.363	15.807	16.404
5	10.88	12.755	7.986	18.31	20.833	18.219	11.539	10.313	11.864	11.505	13.315	11.014	10.906	14.421	17.188
6	-1.916	-0.451	-3.778	7.437	7.365	19.347	0.559	-5.329	-3.481	-0.774	-1.881	0.799	-1.841	4.985	4.033
7	-10.68	-8.467	-6.965	20.826	-5.827	2.649	-8.524	-7.542	-5.351	-5.787	-6.263	-9.752	-7.722	-11.26	-1.774
8	0.862	2.894	5.481	15.316	20.312	1.618	2.842	4.91	8.231	4.957	6.892	10.295	8.349	12.888	12.754
9	4.417	6.781	9.134	23.19	22.009	23.436	6.848	9.188	12.163	9.28	11.993	14.03	11.55	14.673	19.023
10	20.897	23.372	26.045	20.978	24.338	22.704	23.372	26.073	26.404	25.245	26.086	28.579	25.817	31.969	31.596
11	13.503	15.9	15.227	22.723	18.814	19.685	15.842	15.616	17.32	17.533	18.176	19.237	18.106	21.461	21.593
12	25.889	27.733	30.128	29.438	27.414	29.28	27.634	29.608	31.625	28.249	32.095	34.875	31.721	33.846	35.849

## Generación de series sintéticas

### Series sintéticas mensuales

**Cuadro 87:** Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación  
Chorobal - Huamanzaña en m<sup>3</sup>/s

Mes	Media	Desv. estandar	Coef. variacion	Sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	0.9214	2.618	2.625	4.113	-0.00411	13.68	-0.02551	-0.01777
Febrero	1.958	5.218	2.189	3.998	0.00444	27.85	-0.0163	-0.01876
Marzo	5.744	10.05	1.68	3.019	-0.06576	49.84	-0.02305	-0.01787
Abril	2.245	3.928	1.662	3.169	-0.02631	20.3	-0.01967	-0.02048
Mayo	0.2193	0.3924	1.692	2.718	-0.1386	1.938	-0.02508	-0.02225
Junio	0.04944	0.07967	1.591	2.085	-0.01521	0.3657	-0.01336	-0.01491
Julio	0.1025	0.2102	2.108	1.694	-0.1075	0.8779	-0.01758	-0.01553
Agosto	0.02378	0.03988	1.653	2.017	-0.00896	0.1792	-0.02637	-0.01407
Setiembre	0.01213	0.0217	1.811	1.671	-0.00956	0.09152	-0.01723	-0.01518
Octubre	0.01303	0.02158	1.629	2.154	-0.00417	0.09997	-0.01932	-0.02286
Noviembre	0.01294	0.02221	1.707	1.954	-0.00626	0.09917	-0.01935	-0.02015
Diciembre	0.02649	0.04539	1.703	2.061	-0.01094	0.2053	-0.01502	-0.01733

**Cuadro 88:** Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación  
Huacapongo – Sifón Virú en m<sup>3</sup>/s

Mes	Media	Desv. estandar	Coef. variacion	Sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	4.089	6.575	1.509	3.047	-0.01054	34.38	-0.01687	-0.02043
Febrero	8.678	11.05	1.215	2.542	-0.185	56.57	-0.01569	-0.02112
Marzo	14.51	19.45	1.248	2.717	0.1794	101.9	-0.01876	-0.02124
Abril	8.109	8.346	0.9998	2.074	-0.1027	41.66	-0.01427	-0.02698
Mayo	1.871	1.708	0.8843	1.913	0.04161	8.61	-0.02188	-0.02377
Junio	0.5911	0.8806	1.325	2.951	0.02754	4.596	-0.00944	-0.01902
Julio	0.2127	0.2438	1.091	2.512	0.01253	1.279	-0.01689	-0.01689
Agosto	0.1135	0.1523	1.266	2.728	0.001873	0.7988	-0.01934	-0.01771
Setiembre	0.07924	0.08951	1.107	1.828	-0.00254	0.4182	-0.01694	-0.02241
Octubre	0.4081	0.8521	1.954	3.53	-0.00435	4.468	-0.01272	-0.02375
Noviembre	0.72	1.242	1.647	3.041	-0.00655	6.231	-0.011	-0.02068
Diciembre	1.887	4.11	2.029	3.589	-0.00384	21.35	-0.01132	-0.01403

**Cuadro 89:** Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación  
Quirihuaac – Moche en m<sup>3</sup>/s

Mes	Media	Desv. estandar	Coef. variacion	Sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	9.427	13.5	1.348	2.827	-0.06828	70.55	-0.00761	-0.02032
Febrero	19.35	23.59	1.156	2.552	0.4588	122.2	-0.00847	-0.02177
Marzo	30.07	29.05	0.9246	2.126	1.98	148.9	-0.0107	-0.02297
Abril	23.54	17.06	0.7147	1.382	1.049	82.85	-0.00691	-0.02848
Mayo	8.174	6.657	0.7938	1.738	0.4676	33.52	-0.01345	-0.02472
Junio	2.289	1.985	0.8484	1.762	0.01978	9.885	-0.00386	-0.02335
Julio	0.9176	0.9539	1.006	2.161	0.000484	4.84	-0.00938	-0.02148
Agosto	0.4723	0.4909	1.005	2.223	0.01331	2.519	-0.01185	-0.0222
Setiembre	0.5404	0.7243	1.267	2.733	0.007512	3.79	-0.0131	-0.02096
Octubre	1.759	2.044	1.123	2.262	-0.1172	10.3	-0.00791	-0.02181
Noviembre	2.819	3.195	1.099	2.192	-0.09976	15.76	-0.00635	-0.01971
Diciembre	4.818	7.268	1.41	2.915	-0.01823	37.84	-0.00528	-0.01473

**Cuadro 90:** Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación  
Salinar – Tambo en m<sup>3</sup>/s

Mes	Media	Desv. estandar	Coef. variacion	Sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	19.67	23.03	1.103	2.492	0.7588	119.8	0.01172	-0.01944
Febrero	50.79	56.54	1.05	2.432	3.064	293.4	0.01119	-0.02068
Marzo	87.17	86.18	0.942	2.152	5.244	440.9	0.01039	-0.02197
Abril	62.56	56.57	0.8713	2.086	6.708	292.2	0.01203	-0.02477
Mayo	23.19	17.37	0.7269	1.708	2.874	89.01	0.01084	-0.0243
Junio	9.336	5.298	0.5619	0.9878	1.027	26.15	0.01903	-0.02429
Julio	5.48	2.87	0.5227	0.4309	0.2098	13.11	0.0194	-0.02414
Agosto	3.534	1.88	0.5322	0.1675	0.04458	8.021	0.01839	-0.02503
Setiembre	2.911	1.782	0.611	0.5898	0.02682	7.887	0.01819	-0.02477
Octubre	3.842	2.613	0.6726	1.249	0.4574	12.57	0.01911	-0.02248
Noviembre	5.012	3.63	0.7089	1.627	0.6525	18.42	0.0159	-0.02267
Diciembre	8.332	9.308	1.06	2.48	0.6847	48.47	0.01475	-0.01602

**Cuadro 91:** Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación  
San Jacinto en m<sup>3</sup>/s

Mes	Media	Desv. estandar	Coef. variacion	Sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	4.078	7.287	1.729	3.212	0.009979	37.82	-0.00082	-0.01283
Febrero	10.2	17.3	1.608	3.23	0.027	93.57	-0.00464	-0.01886
Marzo	13.71	19.23	1.342	2.807	0.04706	103.2	-0.00725	-0.0173
Abril	7.237	13.7	1.727	3.559	0.04104	77.41	-0.00458	-0.01762
Mayo	2.938	6.29	2.03	3.588	0.001884	33.21	-0.00962	-0.01869
Junio	0.9178	1.956	1.957	3.793	0.000982	11.11	-0.00169	-0.02077
Julio	0.4357	0.6203	1.358	2.903	0.00155	3.388	-0.00552	-0.01994
Agosto	0.2933	0.3685	1.223	2.479	0.000616	1.908	-0.00618	-0.02076
Setiembre	0.1855	0.2193	1.153	2.376	0.000694	1.134	-0.0057	-0.02094
Octubre	0.3851	0.7505	1.828	3.613	0.000229	4.206	-0.00759	-0.01654
Noviembre	0.3575	0.642	1.671	3.455	0.001821	3.616	-0.00658	-0.01503
Diciembre	1.267	2.651	2.005	3.555	0.001244	13.98	-0.00409	-0.0125

**Cuadro 92:** Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación  
Sector Tutuma en m<sup>3</sup>/s

Mes	Media	Desv. estandar	Coef. variacion	Sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	9.469	15.15	1.497	3.245	-0.00351	85.22	-0.00363	-0.01245
Febrero	16.98	16.84	0.9656	2.142	3.458	86.56	-0.00398	-0.01803
Marzo	20.19	15.42	0.7535	1.452	-0.1132	76.76	-0.00772	-0.02083
Abril	13.48	10.03	0.7361	1.268	-0.8277	48.87	-0.00179	-0.02513
Mayo	5.097	3.514	0.6862	0.969	-0.5274	16.34	-0.00783	-0.0199
Junio	2.468	2.084	0.842	1.083	-0.6156	9.081	-0.00106	-0.02082
Julio	1.422	1.687	1.177	1.891	-0.162	7.387	-0.00691	-0.01694
Agosto	0.722	0.9542	1.31	2.069	-0.1039	4.243	-0.00872	-0.01928
Setiembre	0.346	0.5595	1.556	2.863	-0.05167	2.96	-0.01119	-0.01791
Octubre	1.282	2.94	2.243	3.553	-0.01822	14.67	-0.01066	-0.01763
Noviembre	1.696	3.271	1.881	3.132	-0.02031	15.98	-0.00864	-0.01571
Diciembre	3.971	6.238	1.53	2.81	-0.138	31.02	-0.00455	-0.0102

**Cuadro 93:** Estadísticas básicas serie sintética mensual generada estación  
Puente Quillo en m<sup>3</sup>/s

Mes	Media	Desv. estandar	Coef. variacion	Sesgo	Valor minimo	valor maximo	ACF(1)	ACF(2)
Enero	2.182	3.632	1.637	2.857	0.001413	17.55	-0.00047	-0.00964
Febrero	4.958	6.736	1.315	2.635	0.009287	34.8	-0.00647	-0.01897
Marzo	5.7	4.784	0.8295	1.429	0.01232	23.09	-0.00642	-0.02078
Abril	3.878	4.229	1.054	2.327	0.0573	22.39	-0.00301	-0.02296
Mayo	1.292	1.038	0.7947	1.408	0.008837	5.024	-0.00736	-0.02183
Junio	0.5213	0.606	1.142	1.923	2.55E-05	2.943	-0.00135	-0.02165
Julio	0.3004	0.5559	1.798	3.137	3.92E-06	2.809	-0.01134	-0.01737
Agosto	0.1627	0.3696	2.241	3.409	0	1.777	-0.01385	-0.01991
Setiembre	0.07198	0.2049	2.896	3.632	0	0.9084	-0.01107	-0.01689
Octubre	0.2441	0.5463	2.17	3.564	0	2.802	-0.00912	-0.01876
Noviembre	0.3201	0.663	2.006	3.35	2.74E-06	3.334	-0.00852	-0.01764
Diciembre	0.8863	1.64	1.782	3.279	6.87E-05	8.596	-0.00483	-0.0099

### Clasificación de escurrimientos sintéticos

#### Series sintéticas mensuales

**Cuadro 94:** Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Chorobal - Huamanzaña

Secuencias	Condicion Hidrologica	N° Serie Generada
Secuencia 1	Muy Seco	882
Secuencia 3	Seco	660
Secuencia 6	Normal	938
Secuencia 9	Humedo	776
Secuencia 10	Muy Humedo	685

**Cuadro 95:** Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Hacapongo - Sifón Virú

Secuencias	Condicion Hidrologica	N° Serie Generada
Secuencia 1	Muy Seco	711
Secuencia 3	Seco	680
Secuencia 6	Normal	241
Secuencia 9	Humedo	802
Secuencia 10	Muy Humedo	776

**Cuadro 96:** Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Quirihuac Moche

Secuencias	Condicion Hidrologica	N° Serie Generada
Secuencia 1	Muy Seco	711
Secuencia 3	Seco	670
Secuencia 6	Normal	108
Secuencia 9	Humedo	404
Secuencia 10	Muy Humedo	305

**Cuadro 97:** Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Salinar – Tambo

Secuencias	Condicion Hidrologica	N° Serie Generada
Secuencia 1	Muy Seco	711
Secuencia 3	Seco	385
Secuencia 6	Normal	346
Secuencia 9	Humedo	595
Secuencia 10	Muy Humedo	305

**Cuadro 98:** Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación San Jacinto

Secuencias	Condicion Hidrologica	N° Serie Generada
Secuencia 1	Muy Seco	611
Secuencia 3	Seco	285
Secuencia 6	Normal	881
Secuencia 9	Humedo	107
Secuencia 10	Muy Humedo	689

**Cuadro 99:** Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Sector Tutuma

Secuencias	Condicion Hidrologica	N° Serie Generada
Secuencia 1	Muy Seco	679
Secuencia 3	Seco	734
Secuencia 6	Normal	592
Secuencia 9	Humedo	286
Secuencia 10	Muy Humedo	262

**Cuadro 100:** Secuencia seleccionadas como condiciones hidrológicas, para su uso en el modelo de planeación, Estación Puente Quillo

Secuencias	Condicion Hidrologica	Nº Serie Generada
Secuencia 1	Muy Seco	147
Secuencia 3	Seco	873
Secuencia 6	Normal	553
Secuencia 9	Humedo	663
Secuencia 10	Muy Humedo	374

### **Anexo 3: Caracterización del sistema natural del Valle de Chao**

La caracterización del sistema natural ha sido tomada como referencia del Inventario y “Evaluación de las Fuentes de Agua Subterránea del Valle del Rio Chao” (ANA 1998).

El área de estudio presenta seis (06) unidades hidrogeológicas claramente definidas, las cuales son:

- Afloramientos Rocosos
- Depósitos Aluviales
- Depósitos Coluviales
- Campos de Dunas
- Mantos de Arena por Aspersión Eólica
- Depósitos Marinos Reciente

Los afloramientos rocosos constituyen el basamento impermeable en el área de estudio y está formado por rocas intrusivas y rocas volcánicas sedimentarias del Grupo Casma.

Los depósitos aluviales son los más importantes para la prospección de las aguas subterráneas y conjuntamente con los depósitos coluviales, campos de dunas, mantos de arena y depósitos marinos recientes, constituyen el acuífero del valle de Chao, hay que indicar que dentro de los depósitos aluviales, están comprendidas las terrazas y el lecho actual del río.

En el área de estudio se han inventariado 671 pozos y 17 afloramientos. Del total de pozos (617), 10 son tubulares (1.5%) y 661 son tajos abiertos (98.5%).

**Cuadro 101:** Distribución de los Tipos de Pozos Valle Chao - 1998

Tipo de Pozo	Distrito Chao	
	Nº de Pozos	%
Tajo Abierto	661	98.5
Tubulares	10	1.5
Total	671	100

En el área de estudio existen 318 pozos utilizados, 127 utilizables y 226 no utilizables. Del total de pozos utilizados (funcionando), 271 pozos son de uso doméstico, 28 pecuarios y 19 de uso agrícola. Ver cuadro adjunto.

**Cuadro 102:** Distribución de Los Pozos Según Su Estado Valle Chao 1998

Distrito	Pozos							
	Utilizados		Utilizable		No Utilizable		Total	
	Nº	%	Nº	%	Nº	%	Nº	%
Chao	318	47.39	127	18.93	226	33.68	671	100

Los pozos presentan profundidades variables, así en los tubulares fluctúan entre 15.00 y 42.00 m y en los tajos abiertos de 1.00 a 17.00 m. Ver cuadro adjunto.

**Cuadro 103:** Profundidades Actuales Máximas y Mínimas Según El Tipo de Pozo Por Distrito Político Valle Chao 1998

Distrito		Tubulares		Tajo Abierto	
		Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Chao	IRHS	295	658	397	194
	Profundidad (m)	42	15	17	1
	Caudal (l/s)	36	-	-	-

El diámetro de los pozos también es variable, así en los tubulares varía de 0.305 m y 0.503 m y los tajos abiertos entre 1.00 y 2.00 m. Del total de pozos inventariados, 119 pozos están equipados, de los cuales 46 tienen motores diesel; 72 motores gasolineros y solo uno (01) eléctrico. En relación a las bombas, 116 son centrífugas de succión, y 03 tipos de turbina vertical.

La explotación de agua en 1981 mediante pozos fue de 13'331,275 m<sup>3</sup>/año (13.33 Hm<sup>3</sup>) que equivale a un caudal continuo de 0.422 m<sup>3</sup>/s.).

**Cuadro 104:** Volumen de Explotación de las Aguas Subterráneas en el Valle Chao 1981

Uso	Volumen (m3)	%
Doméstico	225,613	1.69
Agrícola	11'376,926	85.34
Pecuario	36,792	0.28
Agrícola – Pecuario	1'691,944	12.69
<b>Total</b>	<b>13'331,275</b>	<b>100</b>

El volumen o masa de agua subterránea explotada en el año 1989, a través de una red de 582 pozos ascendió a 25 millones de m<sup>3</sup>, de este volumen 24.17 millones (96.5%) correspondieron a pozos tajo abierto y solo 0.8 millones (3.3%) a los pozos tubulares. El 99.7% de explotación se utilizó preferentemente para uso agrícola.

**Cuadro 105:** Volumen de Explotación de Las Aguas Subterráneas en el Valle Chao 1989

Tipo De Pozo	Uso				Total	
	Agricola		Domestico		Volumen m <sup>3</sup>	%
	Volumen m <sup>3</sup>	%	Volumen m <sup>3</sup>	%		
Tubular	814,955	100	0	0	814,955	100
Tajo Abierto	24,167,320	99.7	72,153	0.3	24,239,473	100
<b>Total</b>	<b>24,982,275</b>	<b>99.71</b>	<b>72,153</b>	<b>0.29</b>	<b>25,054,428</b>	<b>100</b>

La explotación en el año 1998 de la napa mediante pozos fue de 1'271,941.36 m<sup>3</sup>/año (1.27 Hm<sup>3</sup>) que equivale a un caudal continuo de 0.04 m<sup>3</sup>/s, es mucho menor que el obtenido en 1981 (13'331,275 m<sup>3</sup>).

Del total explotado, 456,830.92 m<sup>3</sup>/año (0.45 Hm<sup>3</sup>) corresponde a uso doméstico; 802,610.40 m<sup>3</sup>/año (0.80 Hm<sup>3</sup>) a uso agrícola y 12,500 m<sup>3</sup>/año al uso pecuario.

**Cuadro 106:** Volumen de Explotación Anual (m<sup>3</sup>) Según Uso en el Valle Chao 1998

Distrito	Explotación por usos (m3)			Total
	Doméstico	Agrícola	Pecuario	
CHAO	456 830.92	802,610.40	12,500.04	1'271,941.36

La explotación mediante los afloramientos de agua, asciende a 64'453,276.8 m<sup>3</sup>/año (64.45 Hm<sup>3</sup>) que equivale un caudal continuo de 2.04 m<sup>3</sup>/seg. Ver cuadro adjunto.

**Cuadro 107:** Características de Los Afloramientos de Aguas Subterráneas Valle Chao  
1998

Nº de Orden	Nombre	Sector	Q (l/s)	Estado	Caso	Explotación Anual (m3)
A - 1	San León	San León	58	Utilizado	Domes-Agrícola	1'829,088
A - 2	Santa Rita Alto	Santa Rita Alto	43	Utilizado	Domes-Agricola	1'356,048
A - 3	Huasaquito	Montegrande	48	Utilizado	Domes-Agricola	1'513,728
A - 4	Montegrande	Montegrande	60	Utilizado	Domes-Agricola	1'892,160
A - 5	Huarango	Porvenir	62	Utilizado	Agrícola	1'955,232
A - 6	Sausalito	Puyto	87	Utilizado	Agrícola	2'743,632
A - 7	Eucalipto	Puyto	50	Utilizado	Agrícola	1'576,800
A - 8	El Inca	El Inca	43	Utilizado	Domes-Agricola	1'356,048
A - 9	Dren El Inca	El Inca	41	Utilizado	Domes-Agricola	1'292,976
A - 10	Los Cañones	Chao	76	Utilizado	Domes-Agricola	2'396,736
A - 11	Santa Rita Baja	Chao	37	Utilizado	Domes-Agricola	1'166,832
A - 12	28 de Julio	Tizal	84	Utilizado	Domes-Agricola	2'649,024
A - 13	Laramie	Laramie	58	Utilizado	Domes-Agricola	1'829,088
A - 14	San Jorge Alto	San Jorge	125	Utilizado	Domes-Agricola	3'942,000
A - 15	Santa Rosa	Santa Rosa	72	Utilizado	Domes-Agricola	2'270,592
A - 16	San Roberto	Buena Vista	75	Utilizado	Domes-Agricola	2'365,200
A - 17	El Lunar	Buena Vista	90	Utilizado	Domes-Agricola	2'838,240
Total						34'973,424

El reservorio acuífero está conformado por depósitos aluviales, coluviales, márinicos recientes y mantos de arena, siendo el más importante el primero de los nombrados (aluvial), el cual litológicamente está constituido por cantos, gravas, gujarros, arenas, arcillas y limos entre mezclados en diferentes proporciones formando horizontes de espesores variables, los mismos que se presentan en forma alternada en sentido vertical.

El acuífero está limitado lateralmente por masas rocosas que afloran a ambos lados y también por cerros testigos, los cuales pertenecen al grupo Casma y rocas intrusivas del cretáceo superior. La napa freática es predominante libre, siendo su fuente de alimentación las aguas que se infiltran en la parte alta de la cuenca, así como también las infiltraciones de

las aguas provenientes del río Chorobal y Huamanzaña, de los canales de regadío y de las tierras de cultivo. La morfología de la napa es relativamente uniforme en la que el desplazamiento del flujo subterráneo sigue dos trayectorias principales, (NE – SO y E-O).

Zona I: San León, Porvenir, Turbinzal, Zona II: Buena Vista Puente Chao, Zona III: Puente Chao, Tizal, La Bocana

**Cuadro 108:** Características de La Morfología de La Napa diciembre 1997 y mayo de 1998-Valle Chao

Zona	Febrero de 1998		
	Sentido	Gradiente	Rango
I	NO a SE	2.90%	305 - 375
	E a O	2.18%	180 - 285
II	NE a SO	1.21%	80 - 180
III	NE a SO	0.68%	30 - 75
	E a O	0.17%	5. - 35

La profundidad de la napa freática en el valle se encuentra entre 1.00 m y 9.00 m.

**Cuadro 109:** Profundidad de la Napa Valle de Chao 1998

Profundidad de la Napa	
Zona	(m)
I	2.00 – 5.00
II	2.00 – 8.00
III	1.00 – 9.00

En el área de estudio se han efectuado tres (03) pruebas de bombeo, cuyo resultado muestra en el cuadro adjunto.

**Cuadro 110:** Resultados de las Pruebas de Bombeo Valle Chao 1998

Pozo IRHS	Transmisividad x 10-2		Permeabilidad x 10-4	
	Descenso	Recuperación	Descenso	Recuperación
13/12/2002	(m2/s)	(m2/s)	(m/s)	(m/s)
358	9012.38	1047.95	781.65	90.89
610	875.26	1256.79	51.82	74.41
284	2371.68	1724.86	47.72	25.65

Los parámetros hidráulicos (T y K) indican que el acuífero presenta aceptables condiciones hidráulicas.

**Cuadro 111:** Radios de Influencia a Diferentes Tiempos de Bombeo Valle Chao 1998

Pozo IRHS	Transmisividad (m2/S)x	Coef. Alm. S (%)	Radios de Influencia (m)									
			6 hr	8 hr	10 hr	12 hr	14 hr	16 hr	18 hr	20 hr	22 hr	24 hr
13/12/2002	10-feb											
285	4993.01	0.88	56.49	65.23	72.93	79.89	86.3	92.25	97.85	103.1	108.2	113
619	23340.34	0.68	139	160.5	179.4	196.5	212.3	226.9	240.7	253.7	266.1	277.9

La conductividad eléctrica en el área de estudio fluctúa entre 0.40 y 7.79 mmhos/cm como se observa en el cuadro adjunto.

**Cuadro 112:** Conductividades Eléctricas Valle Chao 1998

Zona	Conductividad Eléctrica	Calidad de las Aguas
	(mmhos/cm)	Subterráneas según Wilcox
I	0.85 – 5.80	Permisible – Inadecuada
II	0.40 – 6.00	Buena – Inadecuada
III	1.99 – 7.79	Permisible - Inadecuada

De acuerdo a la carta e isosalinidad del acuífero del valle Chao correspondiente al mes de noviembre del 2007, en la parte baja del valle que comprende los sectores: Tizal, Cerro Santa Rosa, Los Cerritos, Jaime, Laramie y San Antonio, el agua subterránea presenta un alto grado de mineralización con valores que fluctúan entre 4.0mS/cm y 25.0 mS/cm, no siendo recomendable para uso agrícola.

Se estima un área afectada de 1,014ha con agua subterránea salina que se encuentra en el rango de 4.0 mS/cm a 6.0mS/cm, así como 360.56 ha con aguas salinas mayor de 6.0 mS/cm.

Según el Estudio de Drenaje del valle Chao bajo la influencia de las aguas del río Santa – Sexto Convenio Chavimochic – PRONADRET, 1989 concluye que en la parte baja del acuífero de Chao se tiene un espesor saturado aprovechable promedio de 26.0 metros y rendimientos específicos que varían de 0.04 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> a 0.05 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

Para determinar la masa de agua subterránea no explotable, por el alto contenido de sales se ha multiplicado el área afectada estimada para el mes de noviembre 2007, el rendimiento específico y el espesor saturado aprovechable, teniendo como resultado para el acuífero de Chao 15.0 Hm<sup>3</sup>.

**Cuadro 113:** Estimación del volumen no explotable, acuífero Chao 2007

C. E mmhos/cm	Área (ha)	Área (m <sup>2</sup> )	Sy	Espesor Saturado	Volumen (m <sup>3</sup> )
4 – 6	1014.59	10,145,900.00	0.04	26	10,551,736.00
6 a mas	360.56	3,605,600.00	0.05	26	4,452,916.00
Total					15,004,652.00

**Cuadro 114:** Conductividad hidráulica insertada en el modelo Modflow

IRHS	Coordenadas		Conductividad Inicial			Conductividad Final		
	Este	Norte	Kx(m/d)	Ky(m/d)	Kz(m/d)	Kx(m/d)	Ky(m/d)	Kz(m/d)
18	760217	9060310	19.20	19.20	1.92	55.00	55.00	5.50
26	761341	9061152	29.90	29.90	2.99	55.00	55.00	5.50
39	762068	9061569	44.93	44.93	4.49	70.00	70.00	7.00
42	761869	9060016	25.05	25.05	2.51	25.00	25.00	2.50
49	762523	9061356	63.00	63.00	6.30	280.00	280.00	28.00
52	762757	9061582	39.39	39.39	3.94	305.00	305.00	30.50
96	762811	9062119	43.20	120.00	4.32	90.00	120.00	9.00
168	761493	9060787	45.79	45.79	4.58	59.00	59.00	5.90
183	761240	9059092	41.71	41.71	4.17	80.00	80.00	8.00
225	758546	9058020	49.95	49.95	5.00	50.00	50.00	5.00
261	758621	9055536	51.49	51.49	5.15	52.00	52.00	5.20
284	756136	9054887	25.65	25.65	2.57	85.00	85.00	8.50
333	758880	9060279	50.11	50.11	5.01	75.00	75.00	7.50
341	758590	9059416	27.28	27.28	2.73	355.00	355.00	35.50
342	758468	9059641	44.06	44.06	4.41	325.00	325.00	32.50
358	757973	9058947	40.89	40.89	4.09	70.00	70.00	7.00
413	756959	9056667	53.50	53.50	5.35	140.00	140.00	14.00
430	757114	9055111	44.32	44.32	4.43	90.00	90.00	9.00
495	752956	9052826	92.40	92.40	9.24	955.00	955.00	95.50
524	754307	9051135	81.20	81.20	8.12	945.00	945.00	94.50
564	751676	9049595	33.17	33.17	3.32	33.00	33.00	3.30
565	751528	9049707	62.78	62.78	6.28	63.00	63.00	6.30
610	751526	9051059	74.41	74.41	7.44	280.00	280.00	28.00
663	749036	9047812	32.80	32.80	3.28	33.00	33.00	3.30

Fuente: Aguilar (2012).

**Cuadro 115:** Almacenamiento específico, rendimiento específico, porosidad efectiva y porosidad total insertada en el modelo Modflow.

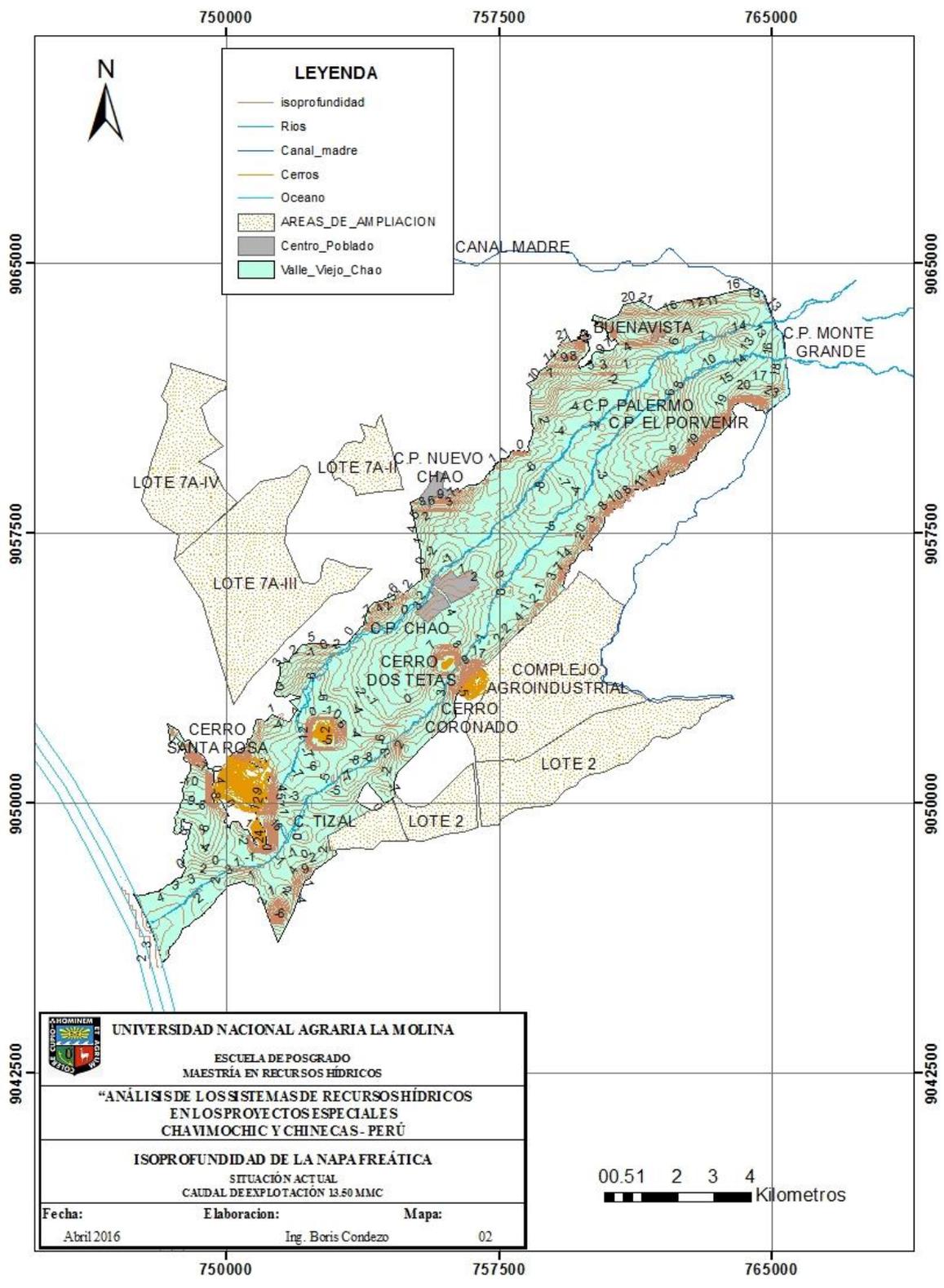
IRHS	Este	Norte	Ss	Sy	Eff.Por	Tot.Por
18	760217	9060310	0.001895954	0.1	0.15	0.3
39	762068	9061569	0.002792587	0.1	0.15	0.3
52	762757	9061582	0.000227221	0.1	0.15	0.3
83	763139	9060042	0.006094183	0.1	0.15	0.3
168	761493	9060787	0.000999512	0.1	0.15	0.3
225	758546	9058020	0.000339958	0.1	0.15	0.3
247	758878	9056199	0.004387064	0.1	0.15	0.3
430	757114	9055111	0.001059883	0.1	0.15	0.3
495	752956	9052826	0.007407407	0.1	0.15	0.3
565	751528	9049707	0.009304386	0.1	0.15	0.3
662	749179	9048472	0.002525418	0.1	0.15	0.3

Fuente: Aguilar (2012).

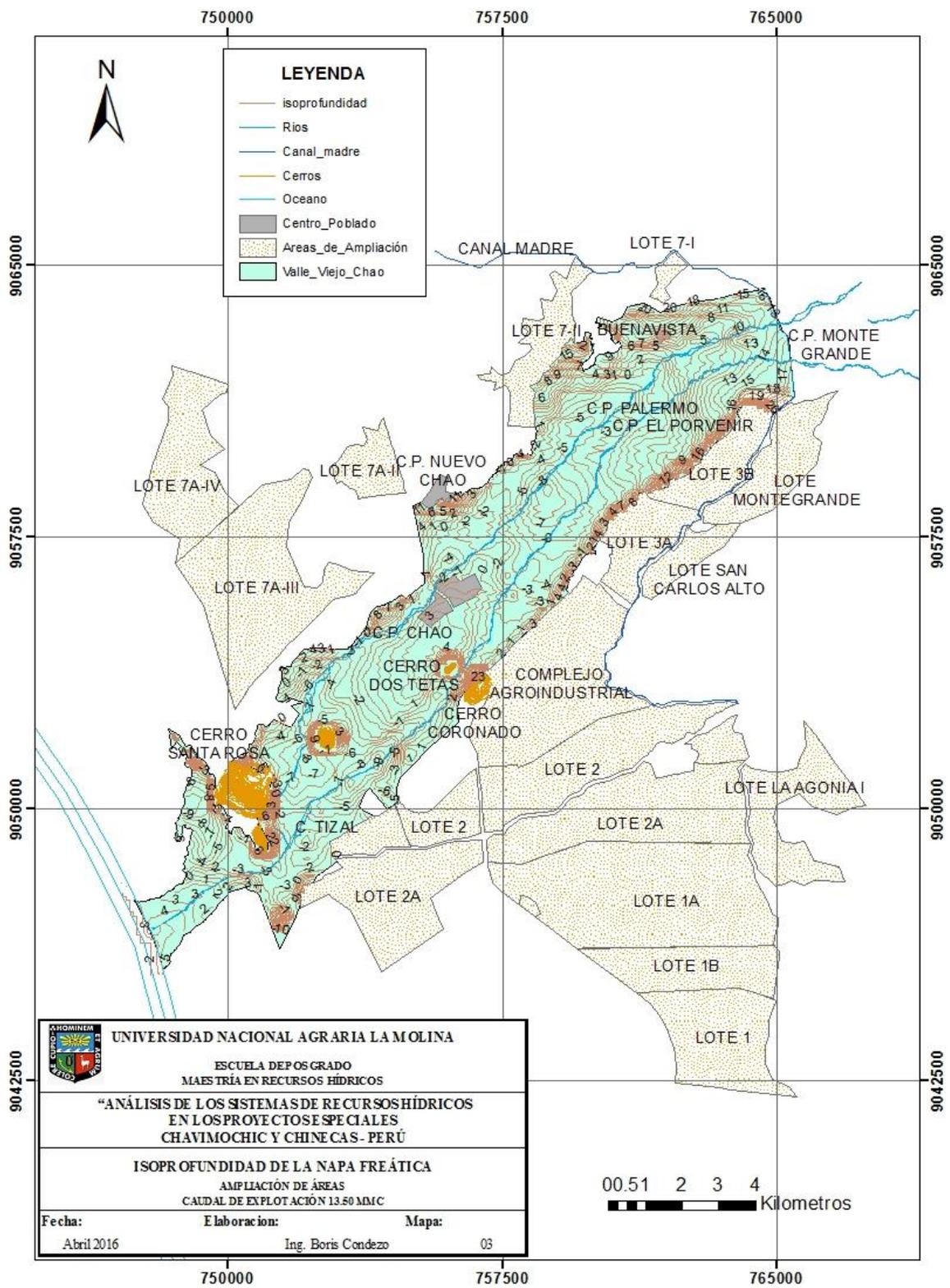
**Cuadro 116:** Evapotranspiración insertada en el modelo Modflow.

Mes	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	Promedio (En mm)	
								mes	diario
Enero	171.57	SD	149.95	163.16	146.56	171.20	165.09	161.25	5.20
Febrero	149.70	139.96	153.06	136.42	136.93	158.66	155.63	147.19	5.26
Marzo	148.43	151.65	167.86	165.65	133.38	155.44	160.50	154.70	4.99
Abril	122.88	141.98	147.05	146.43	141.33	130.35	156.93	140.99	4.70
Mayo	98.37	135.79	115.17	105.47	87.87	125.85	137.02	115.08	3.71
Junio	54.94	90.70	101.36	75.25	82.79	117.65	82.79	86.50	2.88
Julio	76.64	75.59	98.58	S.D.	71.27	74.06	91.75	81.31	2.62
Agosto	86.63	98.03	99.57	S.D.	82.63	93.61	93.72	92.37	2.98
Setiembre	122.15	125.88	107.42	102.62	83.43	93.61	116.45	107.37	3.46
Octubre	52.12	126.34	140.82	126.54	93.73	114.17	112.51	109.46	3.53
Noviembre	144.43	139.60	144.66	132.93	100.91	150.57	128.08	134.45	4.48
Diciembre	261.31	146.21	140.30	145.42	148.91	149.86	126.54	159.79	5.15

Fuente: P.E. Chavimochic (2010).



**Figura 70:** Isoprofundidad de la napa freática Escenario 1.



**Figura 71:** Isoprofundidad de la napa freática Escenario 2.

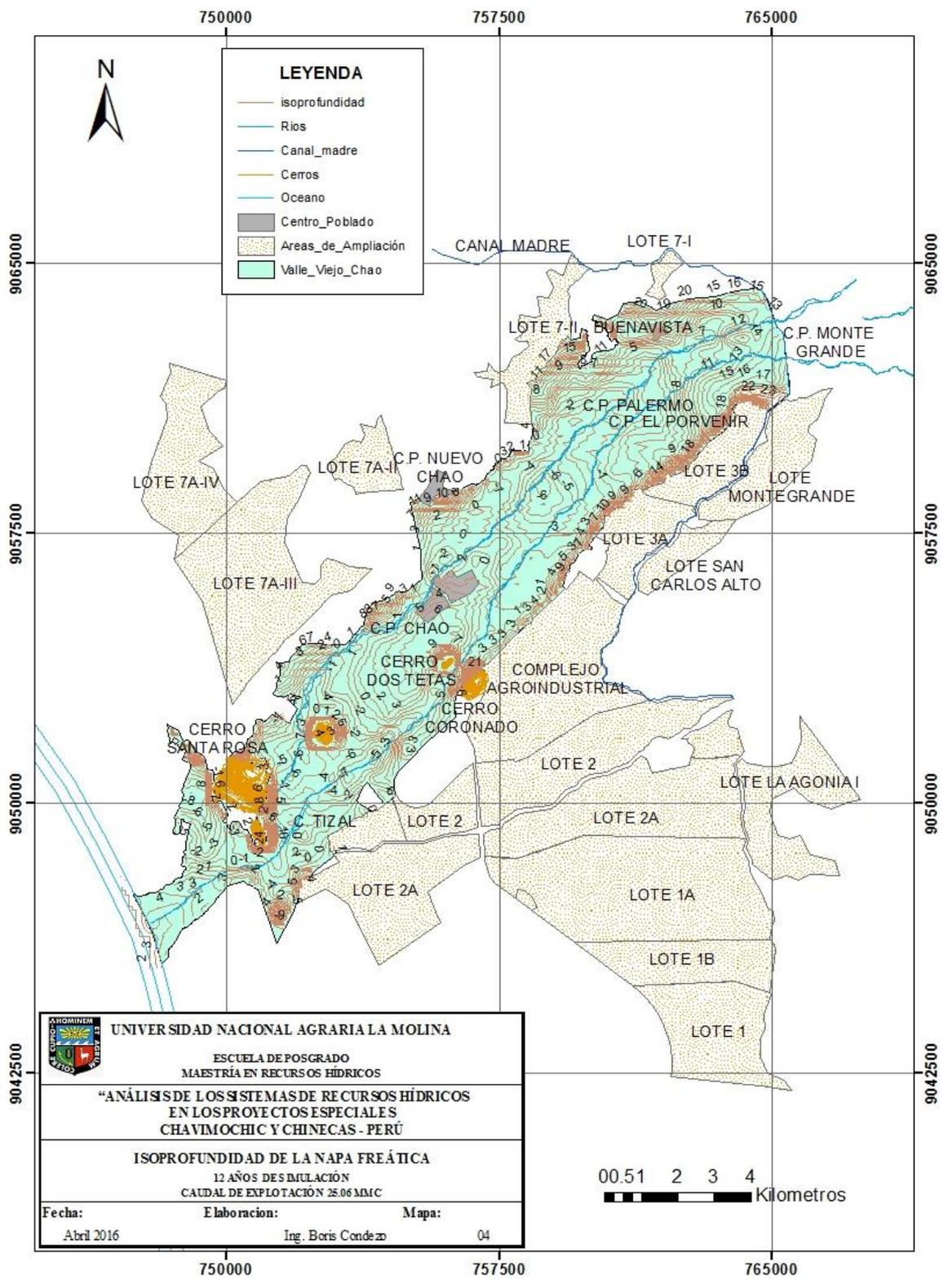


Figura 72: Isoprofundidad de la napa freática Escenario 3.

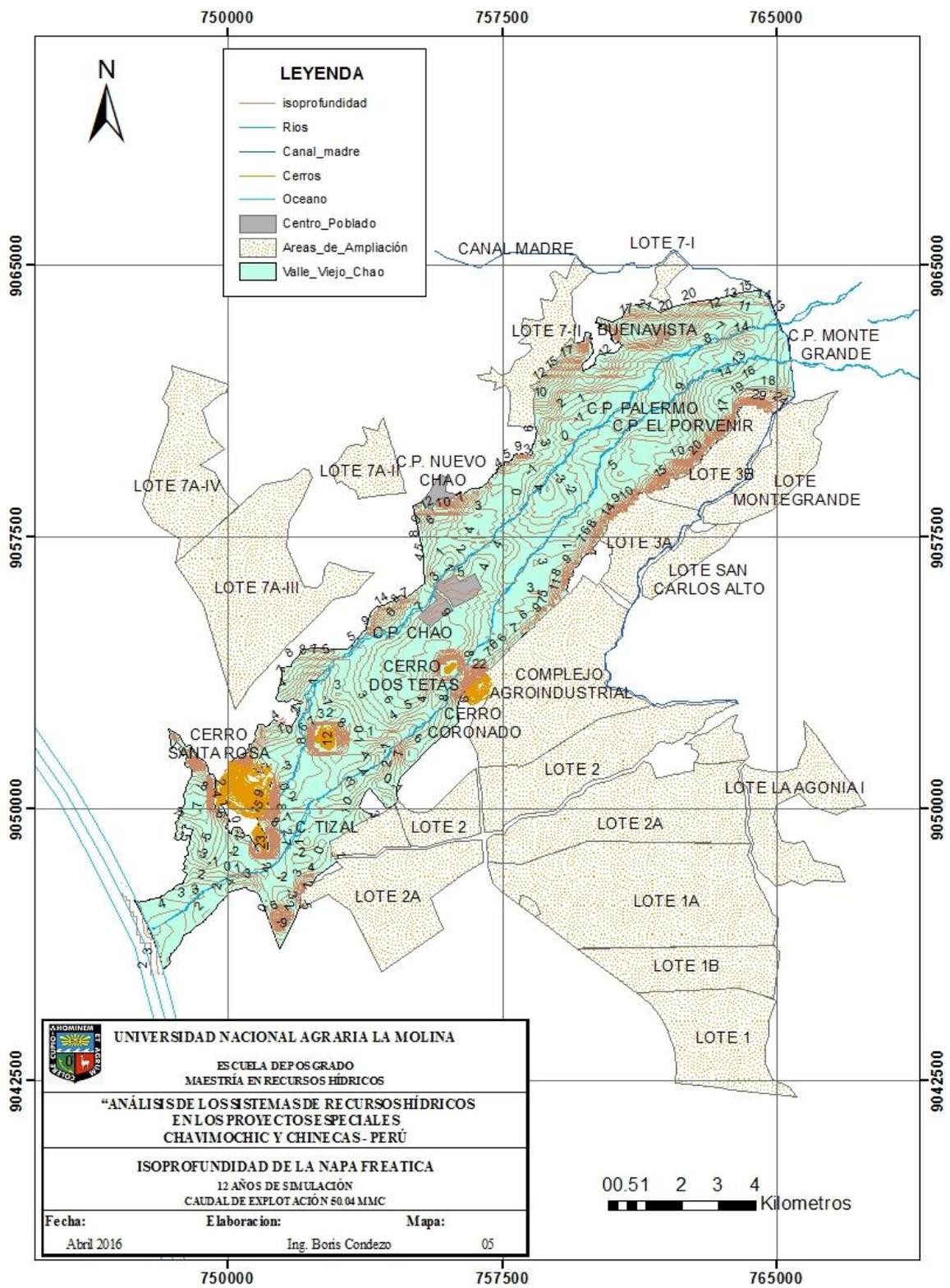


Figura 73: Isoprofundidad de la napa freática Escenario 4.

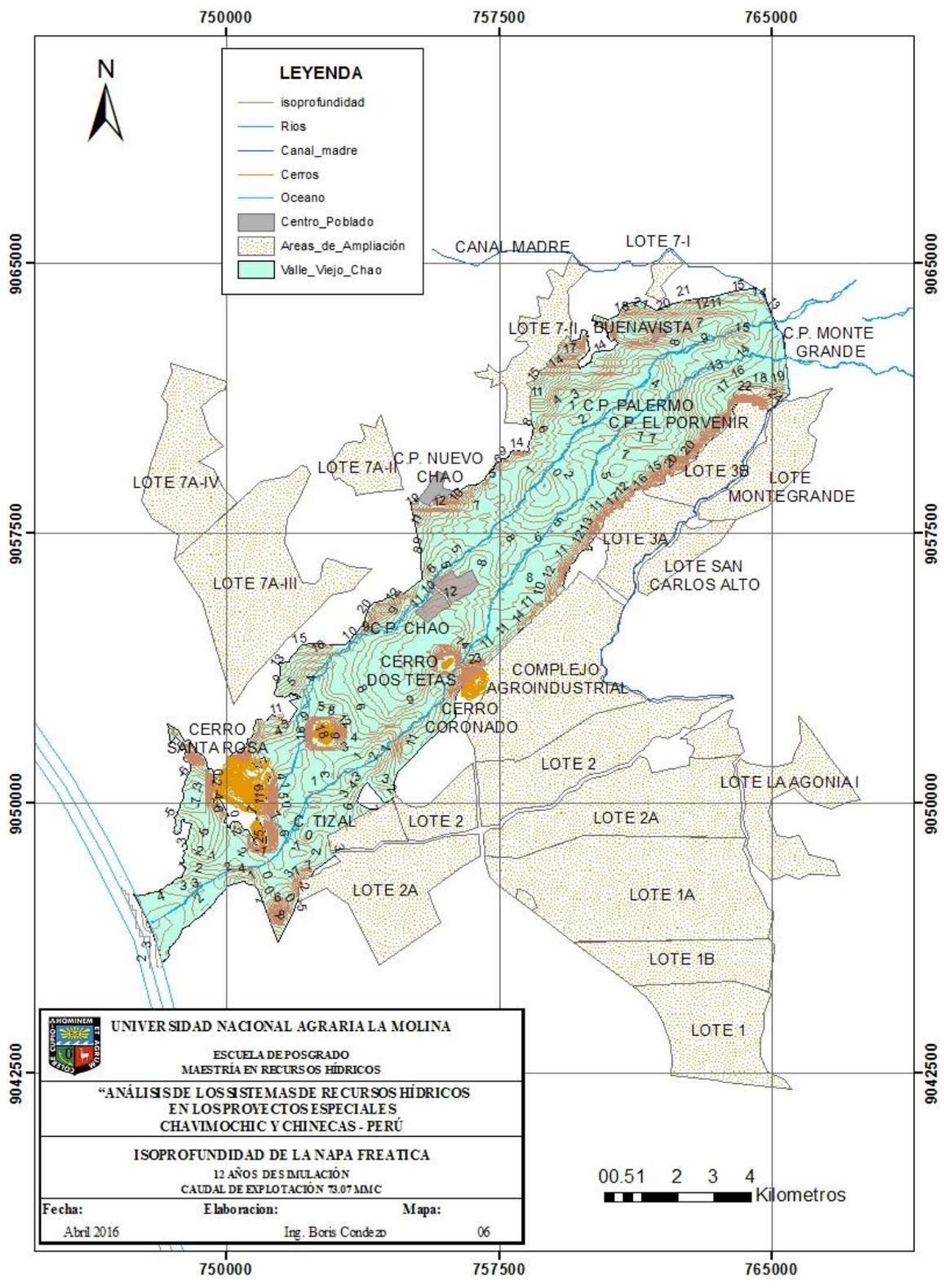


Figura 74: Isoprofundidad de la napa freática Escenario 5.

#### Anexo 4: Oferta de agua subterránea

A continuación se presenta los volúmenes de explotación de agua subterránea y de filtraciones en los diferentes valles. Los afloramientos de agua o filtraciones se encuentran ubicados en la cuenca baja o valle, y tienen la característica común de representar filtraciones del flujo sub superficial o hipodérmicos de los cauces de los ríos.

**Cuadro 117:** Explotación actual de agua subterránea Chavimochic en Hm<sup>3</sup>

<b>Ofertas de agua Subterranea</b>														
<b>Descripción</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>TOTAL</b>	
<b>I y II ETAPA</b>														
<b>Total Valle de Chao</b>														
Aguas Subterraneas	1.13	0.96	1.20	1.17	1.17	1.04	1.03	1.12	1.15	1.24	1.17	1.16	13.53	
<b>Total Valle de Viru</b>														
Aguas Subterraneas	0.03	0.02	0.03	0.14	1.40	1.08	0.92	1.13	1.29	1.39	1.29	1.40	10.11	
<b>Total Valle de Moche</b>														
Aguas Subterraneas	0.41	0.48	0.47	0.49	0.50	2.17	2.06	2.09	2.11	2.17	2.17	2.18	17.30	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	1.56	1.46	1.69	1.79	3.07	4.29	4.01	4.33	4.56	4.81	4.63	4.73	40.94	
<b>III ETAPA</b>														
<b>Valle de Chicama</b>														
Aguas Subterraneas	41.08	41.33	19.48	22.53	41.63	38.85	40.15	38.64	37.10	37.94	36.64	36.75	100.22	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	41.08	41.33	19.48	22.53	41.63	38.85	40.15	38.64	37.10	37.94	36.64	36.75	100.22	
<b>Total Aguas Subterraneas</b>	<b>42.64</b>	<b>42.79</b>	<b>21.17</b>	<b>24.32</b>	<b>44.70</b>	<b>43.14</b>	<b>44.16</b>	<b>42.97</b>	<b>41.66</b>	<b>42.75</b>	<b>41.27</b>	<b>41.48</b>	<b>141.16</b>	

**Cuadro 118:** Explotación futura de agua subterránea Chavimochic en Hm<sup>3</sup>

<b>Ofertas de agua subterranea</b>														
<b>Descripción</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>TOTAL</b>	
<b>I y II ETAPA</b>														
<b>Total Valle de Chao</b>														
Filtraciones	1.91	1.20	3.27	3.63	3.52	2.63	1.56	1.99	3.95	5.24	4.51	2.94	36.35	
Aguas Subterraneas	1.70	1.53	1.70	1.64	1.70	1.64	1.70	1.70	1.64	1.70	1.64	1.70	20.00	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	3.61	2.73	4.97	5.27	5.22	4.27	3.26	3.69	5.59	6.94	6.15	4.64	56.35	
<b>Total Valle de Viru</b>														
Filtraciones	1.75	1.58	1.75	1.69	1.75	1.69	1.48	1.48	1.43	1.48	1.69	1.75	19.53	
Aguas Subterraneas	2.50	2.50	2.50	2.50	5.30	6.00	6.00	5.85	6.00	6.00	6.00	4.85	56.00	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	4.25	4.08	4.25	4.19	7.05	7.69	7.48	7.33	7.43	7.48	7.69	6.60	75.53	
<b>Total Valle de Moche</b>														
Filtraciones	3.33	3.87	3.80	3.97	4.09	3.56	2.67	2.85	3.09	3.58	3.54	3.58	41.91	
Aguas Subterraneas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	14.00	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	3.33	3.87	3.80	3.97	4.10	5.56	4.67	4.85	5.09	5.58	5.54	5.58	55.92	
<b>III ETAPA</b>														
<b>Valle de Chicama</b>														
Filtraciones	9.18	12.73	13.98	11.53	9.73	8.05	8.25	6.74	6.30	6.04	4.74	4.85	102.10	
Aguas Subterraneas	6.26	0.00	0.00	0.00	22.01	18.72	23.22	18.60	20.92	27.61	26.97	20.99	185.30	
Sub-Total (Hm <sup>3</sup> )	15.43	12.73	13.98	11.53	31.74	26.76	31.47	25.34	27.22	33.65	31.71	25.84	287.41	
<b>Total Aguas Subterraneas</b>	<b>26.62</b>	<b>23.40</b>	<b>27.00</b>	<b>24.96</b>	<b>48.11</b>	<b>44.29</b>	<b>46.88</b>	<b>41.21</b>	<b>45.33</b>	<b>53.65</b>	<b>51.09</b>	<b>42.66</b>	<b>475.21</b>	

**Cuadro 119:** Explotación futura con incremento de agua subterránea Chavimochic en Hm<sup>3</sup>

<b>Ofertas de agua subterránea</b>													
<b>Descripción</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>TOTAL</b>
<b>I y II ETAPA</b>													
<b>Total Valle de Chao</b>													
Filtraciones	1.91	1.20	3.27	3.63	3.52	2.63	1.56	1.99	3.95	5.24	4.51	2.94	36.35
Aguas Subterráneas	6.21	5.59	6.21	5.99	6.21	5.99	6.21	6.21	5.99	6.21	5.99	6.21	73.00
<b>Sub-Total (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>8.12</b>	<b>6.79</b>	<b>9.48</b>	<b>9.61</b>	<b>9.72</b>	<b>8.62</b>	<b>7.77</b>	<b>8.20</b>	<b>9.94</b>	<b>11.45</b>	<b>10.50</b>	<b>9.15</b>	<b>109.35</b>
<b>Total Valle de Viru</b>													
Filtraciones	1.75	1.58	1.75	1.69	1.75	1.69	1.48	1.48	1.43	1.48	1.69	1.75	19.53
Aguas Subterráneas	3.39	3.39	3.39	3.39	7.19	8.14	8.14	7.94	8.14	8.14	8.14	6.58	76.00
<b>Sub-Total (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>5.14</b>	<b>4.97</b>	<b>5.14</b>	<b>5.09</b>	<b>8.94</b>	<b>9.84</b>	<b>9.62</b>	<b>9.42</b>	<b>9.58</b>	<b>9.62</b>	<b>9.84</b>	<b>8.33</b>	<b>95.53</b>
<b>Total Valle de Moche</b>													
Filtraciones	3.33	3.87	3.80	3.97	4.09	3.56	2.67	2.85	3.09	3.58	3.54	3.58	41.91
Aguas Subterráneas	3.39	3.39	3.39	3.39	7.19	8.14	8.14	7.94	8.14	8.14	8.14	6.58	76.00
<b>Sub-Total (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>6.72</b>	<b>7.26</b>	<b>7.19</b>	<b>7.36</b>	<b>11.28</b>	<b>11.70</b>	<b>10.81</b>	<b>10.79</b>	<b>11.23</b>	<b>11.72</b>	<b>11.68</b>	<b>10.16</b>	<b>117.91</b>
<b>III ETAPA</b>													
<b>Valle de Chicama</b>													
Filtraciones	9.18	12.73	13.98	11.53	9.73	8.05	8.25	6.74	6.30	6.04	4.74	4.85	102.10
Aguas Subterráneas	7.65	0.00	0.00	0.00	26.93	22.90	28.42	22.76	25.59	33.79	33.01	25.68	226.74
<b>Sub-Total (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>16.83</b>	<b>12.73</b>	<b>13.98</b>	<b>11.53</b>	<b>36.66</b>	<b>30.95</b>	<b>36.67</b>	<b>29.50</b>	<b>31.90</b>	<b>39.83</b>	<b>37.74</b>	<b>30.53</b>	<b>328.84</b>
<b>Total Aguas Subterráneas</b>	<b>36.82</b>	<b>31.74</b>	<b>35.79</b>	<b>33.59</b>	<b>66.61</b>	<b>61.11</b>	<b>64.87</b>	<b>57.91</b>	<b>62.64</b>	<b>72.62</b>	<b>69.76</b>	<b>58.17</b>	<b>651.64</b>

**Cuadro 120:** Explotación actual de agua subterránea Chincas en Hm<sup>3</sup>

<b>Ofertas de agua subterránea</b>													
<b>Descripción</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Valle del Santa</b>													
Aguas Subterráneas	0.00	0.00	0.00	0.02	0.22	0.17	0.14	0.18	0.20	0.22	0.20	0.22	1.59
<b>Valle de Lacramarca</b>													
Aguas Subterráneas	0.05	0.04	0.05	0.25	2.56	1.98	1.68	2.06	2.36	2.56	2.37	2.56	18.53
<b>Valle de Nepeña</b>													
Aguas Subterráneas	0.05	0.05	0.05	0.26	2.70	2.08	1.77	2.17	2.49	2.69	2.50	2.70	19.52
<b>Valle de Casma</b>													
Aguas Subterráneas	0.03	0.02	0.03	0.13	1.35	1.04	0.89	1.09	1.25	1.35	1.25	1.35	9.76
<b>Total Aguas Subterráneas</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>	<b>0.26</b>	<b>2.70</b>	<b>2.08</b>	<b>1.77</b>	<b>2.17</b>	<b>2.49</b>	<b>2.69</b>	<b>2.50</b>	<b>2.70</b>	<b>19.52</b>

**Cuadro 121:** Explotación futura de agua subterránea Chincas en Hm<sup>3</sup>

<b>Ofertas de agua subterránea</b>													
<b>Descripción</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Valle del Santa</b>													
Aguas Subterráneas	0.20	0.18	0.20	1.04	10.65	8.21	6.99	8.57	9.82	10.62	9.85	10.65	77.00
<b>Valle de Lacramarca</b>													
Aguas Subterráneas	0.24	0.22	0.24	1.26	12.87	9.92	8.44	10.36	11.87	12.83	11.90	12.87	93.00
<b>Valle de Nepeña</b>													
Aguas Subterráneas	0.13	0.12	0.13	0.70	7.12	5.49	4.68	5.73	6.57	7.10	6.59	7.12	51.50
<b>Valle de Casma</b>													
Aguas Subterráneas	0.13	0.12	0.13	0.68	6.97	5.38	4.58	5.61	6.43	6.95	6.45	6.97	50.40
<b>Total Aguas Subterráneas</b>	<b>0.70</b>	<b>0.63</b>	<b>0.70</b>	<b>3.67</b>	<b>37.62</b>	<b>29.00</b>	<b>24.68</b>	<b>30.28</b>	<b>34.69</b>	<b>37.51</b>	<b>34.80</b>	<b>37.62</b>	<b>271.90</b>