

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS



**“MODELACIÓN Y PROYECCIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS
CON FINES DE OFERTA HÍDRICA EN LA ZONA DE LA CUENCA ALTA DEL
RÍO GUADALQUIVIR APLICANDO EL MODELO WEAP”**

Por:

VALERIANO LEÓN KHALIL

Semestre - I - 2020
TARIJA – BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS

**“MODELACIÓN Y PROYECCIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS
CON FINES DE OFERTA HÍDRICA EN LA ZONA DE LA CUENCA ALTA DEL
RÍO GUADALQUIVIR APLICANDO EL MODELO WEAP”**

Por:

VALERIANO LEÓN KHALIL

Proyecto de grado presentado a consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISRAEL SARACHO” como requisito para optar el grado académico de Licenciatura de Ingeniería Civil.

Octubre 2020
TARIJA - BOLIVIA

V°B°

M.Sc. Ing. Ernesto Álvarez Gozalvez
**DECANO FACULTAD DE
CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

M.Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa
**VICEDECANA FACULTAD
DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

TRIBUNAL:

M.Sc. Ing. Jaime Orlando Zenteno Benítez

M.Sc. Ing. Oscar Ricaldi Torrez

M.Sc. Ing. Ilsen Copa Almazán.

Advertencia

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo éstas responsabilidad del autor.

DEDICATORIA

A mi amada familia, que siempre estuvo apoyándome, brindándome su cariño, y creyendo firmemente que lograría culminar esta etapa académica. A pesar de todas las vicisitudes en mi corta vida, hoy felizmente, puedo decir que llegué a la meta y cumplí con mi objetivo. “Soy un INGENIERO”.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, por haberme acompañado en cada momento, fortaleciendo mi mente, cuerpo y alma para poder culminar esta etapa académica.

A mis padres; Carmelo Valeriano I. y Marina León G. a mi hermana; Ivonne Valeriano L., que siempre me brindaron su apoyo y me acompañaron en todo este recorrido.

A Valeria Lozano H., que me apoyó y me brindó su ayuda para culminar mi proyecto.

Al Msc. Ing. Gustavo Ayala Ticona, quien me brindó su tiempo para guiarme en el manejo del software WEAP, como también al Ing. Darío Segovia Garzón y demás docentes que me otorgaron conocimientos y experiencias durante el proceso del proyecto.

MODELACIÓN Y PROYECCIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS CON FINES DE OFERTA HÍDRICA EN LA ZONA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR APLICANDO EL MODELO WEAP

ABREVIATURAS.....5

RESUMEN.....6

1. INTRODUCCIÓN.....1

1.1. ANTECEDENTES3

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA5

1.3. JUSTIFICACIÓN5

1.4. OBJETIVOS.....6

1.4.1. Objetivo general.....6

1.4.2. Objetivos específicos.6

1.5. ALCANCE.....7

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO8

2.1. UBICACIÓN Y ÁREA DE ESTUDIO8

2.1.1. Ubicación político administrativo.8

2.1.2. Ubicación geográfica.12

2.2. ASPECTOS FÍSICOS EN LA ZONA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR12

2.2.1. Geología y geomorfología.14

2.2.2. Suelos.....14

2.2.3. Cobertura Vegetal.16

2.2.4. Hidrografía.17

2.3. CLIMATOLOGÍA Y RIESGOS CLIMÁTICOS EN LA ZONA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO GUADALQUIVIR.....18

2.3.1. Clima.....18

2.3.1.1. <i>Temperatura</i>	19
2.3.1.2. <i>Precipitación</i>	20
2.3.2. Riesgos climáticos.....	20
2.3.2.1. <i>Inundación</i>	21
2.3.2.2. <i>Sequía</i>	22
2.3.2.3. <i>Granizada y Heladas</i>	23
2.3.2.4. <i>Vientos</i>	23
2.3.3. Cambio climático.....	23
2.3.3.1. <i>Quinto Informe de IPCC</i>	24
2.3.3.1.1. <i>Impactos del cambio climático</i>	25
2.3.3.2. <i>Cambio climático en Tarija</i>	26
2.3.3.2.1. <i>Nevada</i>	27
2.4. CARACTERÍSTICAS DEL USO DEL SUELO.....	29
2.4.1. <i>Agricultura</i>	29
2.4.2. <i>Agropecuaria</i>	30
2.5. ASPECTOS EN EL USO DEL RECURSO HÍDRICO.....	30
2.5.1. <i>Uso de agua para consumo humano</i>	30
2.5.2. <i>Uso de agua para riego</i>	31
2.6. ACTIVIDADES SOCIOECONÓMICAS	31
2.6.1. <i>Población</i>	31
2.6.2. <i>Forestal</i>	32
2.6.3. <i>Turística</i>	32
3. MARCO TEÓRICO.....	33
3.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA.....	33
3.1.1. <i>Definición de la hidrología</i>	33

3.1.2. El ciclo hidrológico.....	34
3.1.3. Balance Hídrico.	35
3.2. GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA	36
3.2.1. Definiciones.....	36
3.2.2. Delimitación.	37
3.2.2.1. <i>Delimitación Pfafstetter</i>	37
3.2.3. Clasificación de una cuenca.....	38
3.2.3.1. <i>En función del tamaño</i>	38
3.2.4. Parámetros de forma.	39
3.2.4.1. <i>Índice de compacidad o Coeficiente de Gravelius (Ic)</i>	39
3.2.4.2. <i>Relación de Elongación (Re)</i>	39
3.2.5. Parámetros de Relieve.	39
3.2.5.1. <i>Curva Hipsométrica</i>	39
3.2.6. Parámetros de la red hidrográfica.	40
3.2.6.1. <i>Clasificación de corrientes de red de drenaje</i>	40
3.2.6.2. <i>Pendiente del cauce principal</i>	41
3.3. PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	42
3.3.1. Precipitación.....	42
3.3.1.1. <i>Precipitación efectiva</i>	42
3.3.2. Evaporación.....	43
3.3.3. Transpiración.....	43
3.3.4. Evapotranspiración (ET).....	44
3.3.4.1. <i>Evapotranspiración potencial de referencia (Eto)</i>	44
3.3.4.2. <i>Humedad relativa</i>	45
3.3.4.3. <i>Velocidad de viento</i>	45

3.3.4.4. <i>Temperatura</i>	46
3.3.4.5. <i>Radicación solar</i>	46
3.3.4.6. <i>Ecuación de Penman-Monteith</i>	47
3.3.4.7. <i>Evapotranspiración real (Etr)</i>	48
3.4. INFILTRACIÓN	49
3.4.1. <i>Definiciones</i>	50
3.4.2. <i>Perfil de humedad del suelo</i>	50
3.4.3. <i>Factores que afectan la capacidad de infiltración</i>	51
3.4.3.1. <i>Condiciones de superficie</i>	51
3.4.3.1.1. <i>Compacidad</i>	51
3.4.3.1.2. <i>Tipos de superficies</i>	52
3.4.3.1.3. <i>Cobertura vegetal</i>	52
3.4.3.1.4. <i>Pendiente de la superficie</i>	52
3.4.3.2. <i>Características del suelo</i>	52
3.4.3.2.1. <i>Textura del suelo</i>	52
3.4.3.2.2. <i>Acción del hombre y de los animales</i>	52
3.5. ESCURRIMIENTO	53
3.5.1. <i>Escorrimento superficial</i>	53
3.5.2. <i>Escorrimento subsuperficial</i>	53
3.5.3. <i>Escorrimento subterráneo</i>	54
3.5.4. <i>Factores que afectan el escurrimiento</i>	55
3.6. MODELO WEAP (WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM)	55
3.6.1. <i>¿Qué es WEAP?</i>	56
3.6.2. <i>¿Quiénes usan WEAP y para qué?</i>	56
3.6.3. <i>Descripción del modelo</i>	56

3.7. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN DEL MODELO WEAP.....	57
3.7.1. Búsqueda de información.....	57
3.7.2. Descripción general del modelo.....	58
3.7.3. Parámetros del modelo hidrológico.	60
3.7.3.1. <i>Coefficiente de cultivo (Kc)</i>	61
3.7.3.2. <i>Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw)</i>	61
3.7.3.3. <i>Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda (Dw)</i>	62
3.7.3.4. <i>Factor de resistencia a la escorrentía (RRF)</i>	63
3.7.3.5. <i>Conductividad en la zona de raíces (Ks)</i>	63
3.7.3.6. <i>Conductividad saturada en la zona profunda (Kd)</i>	64
3.7.3.7. <i>Dirección preferencial de flujo (f)</i>	64
3.7.3.8. <i>Nivel de humedad en la zona de raíces inicial (Z1)</i>	64
3.7.3.9. <i>Nivel de humedad en la zona profunda inicial (Z2)</i>	65
3.7.4. Calibración.	66
3.7.4.1. <i>Medidas de ajuste</i>	66
3.7.5. Creación de Escenarios.	67
4. METODOLOGÍA	69
4.1. SELECCIÓN DE ESCALAS Y PERIODO DE ESTUDIO	69
4.1.1. Escala Temporal.	69
4.1.2. Escala Espacial.	70
4.1.3. Periodo histórico de estudio.....	70
4.2. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN	71
4.2.1. Meteorológica.....	71
4.2.1.1. <i>Precipitación y Temperatura</i>	71
4.2.1.2. <i>Humedad Relativa Velocidad de Viento y Nubosidad</i>	74

4.2.2. Hidrométrica.....	81
4.2.3. Información temática.	83
4.2.3.1. Información de Modelos de Elevación Digital (DEM).	83
4.2.3.2. Cobertura, vegetación, uso y tipo de suelo.	85
4.2.4. Demanda.....	85
4.2.4.1. Demanda de agua para riego.	85
4.2.4.2. Demanda de agua para consumo humano.	86
4.3. PROCESAMIENTO Y VALIDACIÓN DE DATOS PARA LA INCORPORACIÓN AL MODELO WEAP.....	87
4.3.1. Delimitación.	87
4.3.2. Parámetros morfométricos de la cuenca.....	89
4.3.3. Meteorológica.....	94
4.3.3.1. Precipitación y Temperatura.	94
4.3.3.2. Humedad relativa, Velocidad del viento y Nubosidad	99
4.3.4. Evapotranspiración.	103
4.3.5. Hidrométrica.....	109
4.3.6. Cobertura vegetal y textura.....	117
4.3.6.1. Caracterización de la cobertura vegetal	117
4.3.6.2. Caracterización de la textura	122
4.3.6.3. Combinación Cobertura vegetal-textura	126
4.3.7. Demanda.....	130
4.3.7.1. Demanda de agua para riego.	130
4.3.7.2. Demanda de agua para consumo humano.	133
4.4. DESARROLLO DEL MODELO.....	136
4.4.1. Delimitación de cuencas.	136
4.4.2. Incorporación de elementos al modelo.....	142

4.4.2.1. <i>Supuestos Clave</i>	143
4.4.2.2. <i>Unidad Hidrológica</i>	148
4.4.2.3. <i>Medidor de caudal</i>	151
4.4.2.4. <i>Elemento de Demanda de riego</i>	152
4.4.2.5. <i>Sitio de demanda de Agua potable</i>	157
4.4.2.6. <i>Embalse</i>	160
4.4.2.7. <i>Derivación</i>	162
4.4.3. <i>Calibración y validación del modelo hidrológico</i>	163
4.4.3.1. <i>Unidad hidrológica Canasmoro</i>	164
4.4.3.2. <i>Unidad hidrológica Sella</i>	169
4.4.3.3. <i>Unidad hidrológica Obrajes</i>	174
4.4.4. <i>Escenarios Futuros</i>	180
4.4.4.1. <i>Embalse Rumicancha</i>	184
4.4.4.1.1. <i>Demanda de riego</i>	186
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	188
5.1. ANÁLISIS DE LA OFERTA Y DEMANDA	188
5.1.1. <i>Comparación de caudales de oferta entre el escenario base y futuro</i>	188
5.1.2. <i>Índice de Escasez</i>	194
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	209
BIBLIOGRAFÍA	219
WEBGRAFÍA	222
ANEXOS	224
ANEXO 1 <i>Datos de caudales en la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	224
ANEXO 2 <i>Datos de precipitación extraídos de las grillas meteorológicas</i>	227
ANEXO 3 <i>Análisis de consistencia para los datos de precipitación del SENAMHI</i>	232

ANEXO 4 Procedimiento para la generación de datos de humedad relativa, velocidad de viento, nubosidad.	240
ANEXO 5 Datos de Horas sol.	244
ANEXO 6 Análisis de los caudales para la calibración y validación.	245
ANEXO 7 Modelo MPI-ESM-MR para un escenario seco.	283
ANEXO 8 Modelo CESMI-CAM5 para un escenario húmedo.	297

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Mapa de la cuenca en estudio</i>	2
Figura 2 <i>Ubicación político Administrativa</i>	11
Figura 3 <i>Ubicación Hidrográfica</i>	13
Figura 4 <i>Riesgo por inundación en la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	21
Figura 5 <i>Riesgo por sequía en la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	22
Figura 6 <i>Nevada en el barrio Lourdes de la ciudad de Tarija</i>	28
Figura 7 <i>Nevada en la comunidad de Sella Quebradas</i>	28
Figura 8 <i>Ciclo Hidrológico</i>	34
Figura 9 <i>Delimitación de cuencas metodología Pfafstetter</i>	38
Figura 10 <i>Características de la curva hipsométrica</i>	40
Figura 11 <i>Componentes de la red de drenaje</i>	41
Figura 12 <i>Descripción gráfica de la evaporación</i>	43
Figura 13 <i>Descripción gráfica de la transpiración</i>	44
Figura 14 <i>Descripción gráfica de la evapotranspiración</i>	45
Figura 15 <i>Infiltración y Percolación</i>	51
Figura 16 <i>Infiltración en una superficie de cobertura vegetal y una superficie urbanizada</i>	53
Figura 17 <i>Escorrentía superficial</i>	54
Figura 18 <i>Escorrentía subsuperficial</i>	54

Figura 19 <i>Escorrentía subterránea</i>	55
Figura 20 <i>Esquema de los elementos hidrológicos del modelo humedad del suelo</i>	60
Figura 21 <i>Estaciones de validación procesadas con la metodología GMET</i>	72
Figura 22 <i>Estaciones en la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir, para la incorporación de datos de precipitación y temperatura</i>	73
Figura 23 <i>Estaciones utilizadas en el BHSB para la generación de las grillas de humedad relativa</i>	75
Figura 24 <i>Estaciones de Humedad Relativa para la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	76
Figura 25 <i>Estaciones utilizadas para la generación de las grillas de velocidad de viento en el BHSB</i>	77
Figura 26 <i>Estaciones de Velocidad del Viento utilizadas la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	78
Figura 27 <i>Estaciones utilizadas para generar la grilla de nubosidad en el BHSB</i>	79
Figura 28 <i>Estaciones de Nubosidad utilizada en la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	80
Figura 29 <i>Estaciones hidrométricas en la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	82
Figura 30 <i>Plataforma para la descarga de imágenes ALOS PALSAR</i>	83
Figura 31 <i>Modelo de Elevación Digital de la plataforma ALOS PALSAR</i>	84
Figura 32 <i>Delimitación de Unidades Hidrológicas</i>	88
Figura 33 <i>Red hídrica y Morfometría</i>	90
Figura 34 <i>Red hídrica y Morfometría</i>	92
Figura 35 <i>Red hídrica y Morfometría</i>	93
Figura 36 <i>Comparación de la precipitación entre estación Trancas y UH Canasmoro</i>	95
Figura 37 <i>Comparación de la precipitación entre estación Sella y UH Sella</i>	96
Figura 38 <i>Comparación de la precipitación entre estación Sella y UH Obrajes</i>	97
Figura 39 <i>Comparación de la precipitación entre estación Coimata y UH Erquis</i>	98
Figura 40 <i>Comparación de la precipitación entre estación Coimata y UH Victoria</i>	99

Figura 41 <i>Configuración del separador decimal y el de listas</i>	100
Figura 42 <i>Comparación de caudales para el periodo de ene. de 1980 a dic. del 2007</i>	109
Figura 43 <i>Periodo inicial de caudales para la calibración de la UH Canasmoro</i>	110
Figura 44 <i>Periodo definido de caudales para la calibración de la UH Canasmoro</i>	111
Figura 45 <i>Periodo inicial de caudales para la validación de la UH Canasmoro</i>	111
Figura 46 <i>Periodo definido de caudales para la validación de la UH Canasmoro</i>	112
Figura 47 <i>Periodo inicial de caudales para la calibración de la UH Sella</i>	112
Figura 48 <i>Periodo definido de caudales para la calibración de la UH Sella</i>	113
Figura 49 <i>Periodo inicial de caudales para la validación de la UH Sella</i>	114
Figura 50 <i>Periodo definido de caudales para la validación de la UH Sella</i>	114
Figura 51 <i>Periodo inicial de caudales para la calibración de la UH Obrajes</i>	115
Figura 52 <i>Periodo definido de caudales para la calibración de la UH Obrajes</i>	115
Figura 53 <i>Periodo inicial de caudales para la validación de la UH Obrajes</i>	116
Figura 54 <i>Periodo definido de caudales para la validación de la UH Obrajes</i>	116
Figura 55 <i>Cobertura Vegetal de la cuenca Alta del río Guadalquivir con leyendas del ZONISIG</i>	119
Figura 56 <i>Mapa de cobertura vegetal, para la cuenca Alta del río Guadalquivir con leyendas definidas</i>	121
Figura 57 <i>Textura de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	123
Figura 58 <i>Mapa de Textura, para la cuenca Alta del río Guadalquivir con leyendas definidas</i>	125
Figura 59 <i>Mapa de combinación cobertura-textura, para la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	128
Figura 60 <i>Mapa combinación cobertura-textura en formato ráster</i>	129
Figura 61 <i>Mapa de áreas de cultivos de la zona Alta del río Guadalquivir</i>	130
Figura 62 <i>Ubicación de la cuenca en estudio en el modelo WEAP</i>	137
Figura 63 <i>Incorporación de archivos</i>	138

Figura 64 <i>Linkeo del landcover cobertura-textura</i>	139
Figura 65 <i>Incorporación de información espacial</i>	140
Figura 66 <i>Información General de la Unidad Hidrológica</i>	141
Figura 67 <i>Unidades Hidrológicas delimitadas en WEAP</i>	142
Figura 68 <i>Elementos de modelación incorporados a la cuenca en estudio</i>	143
Figura 69 <i>Supuestos clave creados para la cuenca en estudio, en el modelo</i>	147
Figura 70 <i>Multiplicación de la precipitación, por los días del mes, en el modelo</i>	148
Figura 71 <i>Incorporación de datos de humedad relativa, viento y nubosidad.</i>	149
Figura 72 <i>Selección de los datos de clima en función de cada UH</i>	149
Figura 73 <i>Editor de ecuaciones</i>	150
Figura 74 <i>Parámetros vinculados con los supuestos clave</i>	151
Figura 75 <i>Incorporación de datos de caudales aforados</i>	152
Figura 76 <i>Creación del nodo de demanda de riego</i>	153
Figura 77 <i>Incorporación de los datos del coeficiente de cultivo</i>	154
Figura 78 <i>Incorporación de la ecuación de precipitación efectiva</i>	154
Figura 79 <i>Incorporación de la precipitación al nodo de demanda</i>	155
Figura 80 <i>Incorporación de la evapotranspiración de referencia</i>	156
Figura 81 <i>Incorporación de la fracción de riego</i>	157
Figura 82 <i>Incorporación del nivel de actividad anual</i>	158
Figura 83 <i>Incorporación de la tasa anual de uso del agua</i>	158
Figura 84 <i>Incorporación de coeficiente de retorno</i>	159
Figura 85 <i>Conceptualización de un embalse para modelar en WEAP</i>	160
Figura 86 <i>Incorporación de los datos de la curva volumen-elevación, presa Huacata</i>	161
Figura 87 <i>Incorporación de la evaporación neta al modelo</i>	162
Figura 88 <i>Incorporación de la máxima derivación</i>	163

Figura 89 <i>Caudal observado vs caudal simulado en la calibración de la UH Canasmoro, para la primera corrida</i>	164
Figura 90 <i>Humedad del suelo profundo Z2 para la primera corrida</i>	165
Figura 91 <i>Caudal observado vs caudal simulado, definido para la calibración de UH Canasmoro</i>	168
Figura 92 <i>Caudal observado vs caudal simulado, definido para la validación de la UH Canasmoro</i>	169
Figura 93 <i>Caudal observado vs caudal simulado, inicial para la calibración de la UH Sella</i>	170
Figura 94 <i>Humedad del suelo profundo Z2 para la primera corrida</i>	171
Figura 95 <i>Caudal observado vs caudal simulado, definido para la calibración de la UH Sella</i>	173
Figura 96 <i>Caudal observado vs caudal simulado, definido para la validación de la UH Sella</i>	174
Figura 97 <i>Caudal observado vs caudal simulado, inicial para la calibración de la UH Obrajes</i>	175
Figura 98 <i>Humedad del suelo profundo Z2 para la primera corrida</i>	176
Figura 99 <i>Humedad del suelo profundo Z2 establecida para la calibración</i>	177
Figura 100 <i>Caudal observado vs caudal simulado, definido para la calibración de la UH Obrajes</i>	179
Figura 101 <i>Caudal observado vs caudal simulado, definido para la validación de la UH Obrajes</i>	180
Figura 102 <i>Unidades Hidrológicas delimitadas en el BH nacional</i>	181
Figura 103 <i>Modelo de escenarios futuros para la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	182
Figura 104 <i>Delimitación de la UHAP Rumicancha</i>	184
Figura 105 <i>Curva Elevación-Volumen de la presa Rumicancha</i>	185
Figura 106 <i>Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Canasmoro</i>	189
Figura 107 <i>Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Sella</i>	191
Figura 108 <i>Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Obrajes</i>	192

Figura 109 <i>Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Victoria</i>	193
Figura 110 <i>Comparación de caudales medios mensuales interanuales de la UH Erquis</i>	194
Figura 111 <i>Análisis de los caudales anuales para la UH Canasmoro</i>	196
Figura 112 <i>Análisis de los caudales anuales para la UH Sella</i>	198
Figura 113 <i>Análisis de los caudales anuales para la UH Obrajes</i>	200
Figura 114 <i>Análisis de los caudales anuales para la UH Victoria</i>	202
Figura 115 <i>Análisis de los caudales anuales para la UH Erquis</i>	204
Figura 116 <i>Índice de escasez para el mes de enero del 2027</i>	207
Figura 117 <i>Índice de escasez para el mes de marzo del 2029</i>	208
Figura 118 <i>Disminución de los caudales medios mensuales interanuales, para un escenario húmedo (2020-2050) en comparación con el histórico (1980-2016)</i>	211
Figura 119 <i>Disminución de los caudales medios mensuales interanuales, para un escenario húmedo (2020-2050) en comparación con el histórico (1980-2016)</i>	212
Figura 120 <i>Disminución de los caudales medios mensuales interanuales, para un escenario seco (2020-2050) en comparación con el histórico (1980-2016)</i>	212
Figura 121 <i>Disminución de los caudales medios mensuales interanuales, para un escenario seco (2020-2050) en comparación con el histórico (1980-2016)</i>	213
Figura 122 <i>Comparación de la demanda total entre el presente estudio y el de SEDEGIA</i>	215
Figura 123 <i>Comparación de la oferta total entre el presente estudio y el de SEDEGIA</i>	215
Figura 124 <i>Análisis del índice de escasez para el año 2038</i>	216

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Área de los Municipios pertenecientes a la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	8
Tabla 2 <i>División política por distrito y comunidad</i>	9
Tabla 3 <i>Clasificación de UH de la cuenca del Plata</i>	12
Tabla 4 <i>Detalle de los censos agropecuarios</i>	29

Tabla 5 <i>Cantidad de agua extraída para consumo humano</i>	30
Tabla 6 <i>Coefficiente de cultivo para valles</i>	49
Tabla 7 <i>Información requerida para el modelo WEAP</i>	58
Tabla 8 <i>Valores referenciales de CRH en mm/m.</i>	62
Tabla 9 <i>Valores de Profundidad Radicular</i>	62
Tabla 10 <i>Índices de área foliar LAI para distintos tipos de cobertura</i>	63
Tabla 11 <i>Valores de Ks para diferentes texturas</i>	64
Tabla 12 <i>Valores estimados para los parámetros del modelo de humedad del suelo</i>	65
Tabla 13 <i>Clasificación de la medición de ajuste de NSE</i>	67
Tabla 14 <i>Clasificación de la medición de ajuste de BIAS</i>	67
Tabla 15 <i>Estaciones Meteorológicas para la Cuenca Alta del río Guadalquivir SENAMHI</i>	81
Tabla 16 <i>Estaciones meteorológicas para la cuenca Alta del río Guadalquivir GRILLAS METEOROLÓGICAS</i>	81
Tabla 17 <i>Estaciones hidrométricas de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	82
Tabla 18 <i>Datos de imágenes ALOS PALSAR</i>	84
Tabla 19 <i>Detalle de las fuentes de información de demanda de riego</i>	86
Tabla 20 <i>Fuentes de captación para agua potable de Tarija</i>	86
Tabla 21 <i>Parámetros morfométricos UH Canasmoro</i>	89
Tabla 22 <i>Parámetros morfométricos UH Sella</i>	89
Tabla 23 <i>Parámetros morfométricos UH Erquis</i>	91
Tabla 24 <i>Parámetros morfométricos UH Victoria</i>	91
Tabla 25 <i>Parámetros morfométricos UH Obrajes</i>	91
Tabla 26 <i>Resultados del análisis curva doble masa</i>	94
Tabla 27 <i>Promedio mensual de precipitación estación Trancas y UH Canasmoro</i>	95
Tabla 28 <i>Análisis estadístico estación Trancas y UH Canasmoro</i>	95

Tabla 29 <i>Promedio mensual de precipitación estación Sella y UH Sella</i>	96
Tabla 30 <i>Análisis estadístico estación Sella y UH Sella</i>	96
Tabla 31 <i>Promedio mensual de precipitación estación Sella y UH Obrajés</i>	96
Tabla 32 <i>Análisis estadístico estación Sella y UH Obrajés</i>	97
Tabla 33 <i>Promedio mensual de precipitación estación Coimata y UH Erquis</i>	97
Tabla 34 <i>Análisis estadístico estación Coimata y UH Erquis</i>	97
Tabla 35 <i>Promedio mensual de precipitación estación Coimata y UH Victoria</i>	98
Tabla 36 <i>Análisis estadístico estación Coimata y UH Victoria</i>	98
Tabla 37 <i>Procedimiento para extraer y generar los datos de humedad relativa, viento y fracción de nubosidad</i>	101
Tabla 38 <i>Datos de humedad relativa para las subcuencas pertenecientes a toda la cuenca Alta del río Guadalquivir, en %</i>	102
Tabla 39 <i>Datos de Velocidad de viento a 2 metros de altura, para las subcuencas pertenecientes a la cuenca Alta del río Guadalquivir, en m/s</i>	102
Tabla 40 <i>Datos de Nubosidad para las subcuencas pertenecientes a la cuenca Alta del río Guadalquivir. No tiene unidades adm</i>	103
Tabla 41 <i>Evapotranspiración referencial UH Canasmoro, en mm</i>	104
Tabla 42 <i>Evapotranspiración referencial UH Sella, en mm</i>	105
Tabla 43 <i>Evapotranspiración referencial UH Obrajés, en mm</i>	106
Tabla 44 <i>Evapotranspiración referencial UH Erquis, en mm</i>	107
Tabla 45 <i>Evapotranspiración referencial UH Victoria, en mm</i>	108
Tabla 46 <i>Caudales depurados de la estación hidrométrica Canasmoro para la calibración</i>	111
Tabla 47 <i>Datos de caudales para la calibración de la UH Canasmoro en m³/s</i>	111
Tabla 48 <i>Caudales depurados de la estación hidrométrica Canasmoro para la validación</i>	112
Tabla 49 <i>Datos de caudales para la validación de la UH Canasmoro en m³/s</i>	112
Tabla 50 <i>Caudales depurados de la estación hidrométrica Sella para la calibración</i>	113

Tabla 51 <i>Datos de caudales para la calibración de la UH Sella en m³/s</i>	113
Tabla 52 <i>Caudales depurados de la estación hidrométrica Sella para la validación</i>	114
Tabla 53 <i>Datos de caudales para la validación de la UH Sella en m³/s</i>	114
Tabla 54 <i>Análisis de los caudales para la calibración de la UH Obrajes</i>	115
Tabla 55 <i>Datos de caudales para la calibración de la UH Obrajes en m³/s</i>	115
Tabla 56 <i>Caudales depurados de la estación hidrométrica Obrajes para la validación</i> ...	116
Tabla 57 <i>Datos de caudales para la validación de la UH Obrajes en m³/s</i>	116
Tabla 58 <i>Leyendas de cobertura vegetal y áreas de influencia en la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	118
Tabla 59 <i>Leyendas de cobertura vegetal para la utilización en WEAP</i>	120
Tabla 60 <i>Leyendas de textura y áreas de influencia en la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	122
Tabla 61 <i>Leyendas de Textura del suelo para la utilización en WEAP</i>	124
Tabla 62 <i>Leyendas de cobertura y textura de suelo utilizadas en el modelo WEAP</i>	126
Tabla 63 <i>Combinación de cobertura vegetal y textura</i>	127
Tabla 64 <i>Superficie de cultivos bajo riego para la zona de la cuenca Alta del río Guadalquivir</i>	131
Tabla 65 <i>Cédula de cultivos</i>	132
Tabla 66 <i>Calendario agrícola y coeficiente de cultivo</i>	133
Tabla 67 <i>Tasas de crecimiento poblacional</i>	133
Tabla 68 <i>Población proyectada para el año 2016</i>	134
Tabla 69 <i>Dotación media diaria (l/hab/d)</i>	134
Tabla 70 <i>Consumo anual para el año 2016</i>	135
Tabla 71 <i>Población y consumo anual de la ciudad de Tarija</i>	136
Tabla 72 <i>Procedimiento para la delimitación de Unidades Hidrológicas en WEAP</i>	141
Tabla 73 <i>Valores de coeficientes de cultivos referenciales, incorporados al modelo</i>	144
Tabla 74 <i>Valores de la capacidad de agua en el suelo, incorporados al modelo</i>	145

Tabla 75 <i>Valores de la capacidad de agua profunda, incorporados al modelo</i>	145
Tabla 76 <i>Valores del factor de resistencia a la escorrentía RRF, incorporados al modelo</i>	146
Tabla 77 <i>Valores del factor de conductividad en la zona de raíces, incorporados al modelo</i>	146
Tabla 78 <i>Valores del factor de conductividad saturada en la zona profunda, incorporados al modelo</i>	146
Tabla 79 <i>Valores de la dirección de flujo, incorporadas al modelo</i>	147
Tabla 80 <i>Valores de Z1 y Z2, incorporados al modelo</i>	147
Tabla 81 <i>Eficiencia de los sistemas de riego</i>	156
Tabla 82 <i>Coefficiente de retorno</i>	159
Tabla 83 <i>Datos de la curva volumen-elevación de la presa Huacata</i>	161
Tabla 84 <i>Evaporación neta del embalse Huacata</i>	162
Tabla 85 <i>Parámetros definidos para la calibración de la UH Canasmoro</i>	167
Tabla 86 <i>Valores de Nash y Bias que se obtuvieron en las 16 corridas del modelo</i>	168
Tabla 87 <i>Parámetros definidos para la calibración de la UH Sella</i>	172
Tabla 88 <i>Valores de Nash y Bias que se obtuvieron en las 11 corridas del modelo</i>	173
Tabla 89 <i>Parámetros definidos para la calibración de la UH Obrajes</i>	178
Tabla 90 <i>Valores de Nash y Bias que se obtuvieron en las 12 corridas del modelo</i>	179
Tabla 91 <i>Factores de precipitación</i>	181
Tabla 92 <i>Factores de temperatura</i>	182
Tabla 93 <i>Datos de la curva volumen-elevación de la presa Rumicancha</i>	185
Tabla 94 <i>Evaporación neta del embalse Rumicancha</i>	186
Tabla 95 <i>Áreas de cultivos regadas por el embalse de Rumicancha</i>	186
Tabla 96 <i>Coefficiente de cultivo y calendario agrícola</i>	187
Tabla 97 <i>Eficiencia de riego</i>	187

Tabla 98 <i>Caudales medios mensuales interanuales para un periodo histórico de 1980-2016 y escenarios proyectados del 2020-2050, en la UH Canasmoro</i>	189
Tabla 99 <i>Caudales medios mensuales interanuales para un periodo histórico de 1980-2016 y escenarios proyectados del 2020-2050, en la UH Sella</i>	190
Tabla 100 <i>Caudales medios mensuales interanuales para un periodo histórico de 1980-2016 y escenarios proyectados del 2020-2050, en la UH Obrajes</i>	191
Tabla 101 <i>Caudales medios mensuales interanuales para un periodo histórico de 1980-2016 y escenarios proyectados del 2020-2050, en la UH Victoria</i>	192
Tabla 102 <i>Caudales medios mensuales interanuales para un periodo histórico de 1980-2016 y escenarios proyectados del 2020-2050, en la UH Erquis</i>	193
Tabla 103 <i>Índice de escasez</i>	194
Tabla 104 <i>Índice de escasez para la UH Canasmoro</i>	197
Tabla 105 <i>Índice de escasez para la UH Sella</i>	199
Tabla 106 <i>Índice de escasez para la UH Obrajes</i>	201
Tabla 107 <i>Índice de escasez para la UH Victoria</i>	203
Tabla 108 <i>Índice de escasez para la UH Erquis</i>	205

ABREVIATURAS

BH	Balance Hídrico
BHSB	Balance Hídrico Superficial de Bolivia
DEM	Modelo Digital de Elevación
CCGUCC	Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile
EIRD	Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres
EMAGUA	Entidad Ejecutora del Medio Ambiente y Agua
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)
GAD	Gobierno Autónomo Departamental

GAM	Gobierno Autónomo Municipal
NB	Norma Boliviana
PNC	Plan Nacional de Cuencas
INE	Instituto Nacional de Estadística
PDC	Plan Director de Cuencas
MIC	Manejo Integral de Cuencas
MMAyA	Ministerio de Medio Ambiente y Agua
GIRH	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
GMET	Gridded Meteorological Ensemble Tool (Herramienta de conjunto meteorológico cuadrículado)
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Sociedad Alemana para Internacional)
MPD	Ministerio de Planificación y Desarrollo
PDA	Plan Departamental del Agua de Tarija
PDGRACC	Plan Departamental de Gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático
PTDI	Plan Territorial de Desarrollo Integral (San Lorenzo)
PRONAR	Programa Nacional de Riego
PROAGRO/GTZ	Programa de Desarrollo Agropecuario Sostenible de la Cooperación Técnica Alemana
SEI	Stockholm Environment Institute (Instituto de medio ambiente de Estocolmo)

SAT	Sistema de Alerta Temprana
SEDEGIA	Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua
SM	Soil Moisture (Método de la humedad del suelo)
UH	Unidad Hidrográfica
VRHR	Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego
WEAP	Water Evaluation and Planning System (Sistema de Evaluación y Planificación del Agua)