

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



**“EVALUACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIANTE  
DISTINTAS FUENTES DE INFORMACIÓN (SATÉLITES Y  
GRILLAS) USADAS EN MODELO LLUVIA - ESCURRIMIENTO  
EN LA CUENCA ALTA DEL RIO GUADALQUIVIR”**

Por:

Mauricio Antonio Romero Subieta

Semestre II – 2019

Tarija - Bolivia

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

**“EVALUACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIANTE  
DISTINTAS FUENTES DE INFORMACIÓN (SATÉLITES Y  
GRILLAS) USADAS EN MODELO LLUVIA - ESCURRIMIENTO  
EN LA CUENCA ALTA DEL RIO GUADALQUIVIR”**

Por:

**Mauricio Antonio Romero Subieta**

Proyecto de grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar por el grado académico de licenciatura en Ingeniería Civil.

Semestre II – 2019

Tarija - Bolivia

.....  
M. Sc. Ing. Ernesto Álvarez Gozalvez  
**DECANO FAC. DE CS. Y TEC.**

.....  
M. Sc. Lic. Elizabeth Castro Figueroa  
**VICEDECANA FAC. DE CS. Y TEC.**

**TRIBUNAL:**

.....  
M. Sc. Ing. Fernando Gutiérrez Zambrana

.....  
M. Sc. Ing. Henry Monzón de los Ríos

.....  
M. Sc. Ing. Moisés Perales Avilés

## CERTIFICADO

La suscrita Profesora de Lenguaje y Literatura, María Luisa Viscarra Flores.

Certifica que, revisado el Proyecto de Grado titulado: "EVALUACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIANTE DISTINTAS FUENTES DE INFORMACIÓN (SATELITES Y GRILLAS) USADAS EN MODELO LLUVIA- ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA ALTA DEL RIO GUADALQUIVIR" presentada por el universitario Mauricio Antonio Romero Subieta, para optar al grado académico de licenciatura en Ingeniera Civil de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Se evidencia que cumple con todos los requisitos exigidos por la gramática pues tanto la redacción como la organización de los párrafos permiten la correcta comprensión que conforman el texto general.

Se respeta la terminología y vocabulario del área.

Tarija, febrero 2020.

  
**Prof. Marina Luisa Viscarra F.**  
PROFESORA-LENGUAJE-LITERATURA  
N - R. 1018

***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 Dios por iluminar mis pasos y a mis madres Sandra Subieta Aracena y Fanny Aracena Guzmán Vda. de Subieta por darme su comprensión, amor y aliento para seguir adelante.*

***“Estoy convencido que la mitad de lo que separa a los emprendedores exitosos de los que han fracasado es la perseverancia”***

***(Steve Jobs)***

### ***Agradecimientos***

*A mis madres Sandra Subieta Aracena y Fanny Aracena Vda. de Subieta por haberme criado, darme su apoyo incondicional, amor y dedicación para formar un hombre de bien.*

*Al PhD. Ing. Mauricio Villazón Gómez que figura como tutor del presente proyecto por todas sus observaciones, confianza, apoyo y amistad brindada.*

*Al MSc. Ing. Mario Arce, por revisar la redacción técnica del documento, brindarme su amistad, buenos momentos y sus mejores deseos.*

*A mis hermanos Daniel y Cristian, a mis tíos José (†), Jaime, Grace y al resto de mi familia por ser una parte muy importante de mi vida y motivarme con su ejemplo y afecto para seguir adelante.*

*A mis tribunales MSc. Ing. Moisés Perales, MSc. Ing. Henry Monzón y MSc. Ing. Luis Gutiérrez por sus acertadas observaciones y su dedicación al revisar el presente documento.*

*A mis amigos de la carrera de Ingeniería Civil de la U.A.J.M.S. con quienes compartí momentos invaluable.*

*A todo el personal del Laboratorio de Hidráulica de la U.M.S.S. en Cochabamba, por la amistad brindada, atenciones, valiosas sugerencias académicas y gratos momentos compartidos.*

***¡Muchas Gracias!***

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción .....	1
1.2. Descripción de la zona de estudio.....	1
1.2.1. Ubicación geográfica .....	1
1.2.2. Descripción general.....	2
1.2.3. Caracterización de la zona de estudio .....	3
1.2.4. Parámetros morfométricos .....	4
1.3. Antecedentes y diagnostico.....	5
1.4. Descripción del problema .....	7
1.5. Formulación del problema .....	7
1.6. Hipótesis .....	7
1.7. Objetivos .....	8
1.7.1. Objetivo general.....	8
1.7.2. Objetivos específicos .....	8
1.8. Delimitaciones .....	8
1.8.1. Delimitación espacial.....	8
1.8.2. Delimitación temporal.....	9
1.8.3. Delimitación del universo .....	9
1.8.4. Delimitación del contenido .....	9
1.9. Justificación del estudio.....	9
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>10</b>
2.1. Marco histórico .....	10
2.1.1. Medición de la precipitación.....	10
2.1.1.1. Pluviómetros .....	10
2.1.1.2. Radar Meteorológico.....	11
2.1.2. Sensores y satélites para la estimación de la lluvia.....	11
2.1.2.1. Sensores en el espectro visible (VIS) e infrarrojo (IR) y satélite geoestacionario ...	12
2.1.3. Fuentes de imágenes satelitales.....	15
2.1.3.1. Precipitación satelital TRMM.....	15
2.1.3.2. Base de datos climáticos WorldClim.....	17
2.1.3.3. Precipitación satelital CHIRPS .....	17



2.1.4.	Interpolación espacial .....	18
2.1.4.1.	Introducción al GMET .....	18
2.1.4.2.	GMET aplicado en Bolivia .....	19
2.1.4.3.	Flujo de trabajo de la herramienta GMET .....	21
2.1.5.	Evapotranspiración.....	21
2.1.5.1.	Penman-Monteith.....	22
2.1.5.2.	FAO Penman-Monteith.....	23
2.1.6.	Modelos matemáticos de lluvia-escurrencimiento .....	24
2.1.6.1.	Experiencias en Balances Hídricos a nivel Latinoamérica y el mundo .....	25
2.1.6.2.	Experiencias en Balances Hídricos a nivel Bolivia .....	25
2.1.7.	Sistema de planificación y evaluación de agua WEAP .....	26
2.1.8.	Modelo de la humedad de suelo.....	27
2.1.8.1.	Hidrología de superficie.....	28
2.1.8.2.	Estimación de parámetros del modelo hidrológico.....	30
2.1.9.	Pruebas de bondad y de ajuste estadístico .....	34
2.1.9.1.	Error absoluto medio MAE (Mean Absolute Error) .....	34
2.1.9.2.	Desviación estándar STD (Standard Desviation).....	35
2.1.9.3.	Raíz del error cuadrático medio RMSE (Root Mean Squared Error).....	35
2.1.9.4.	Eficiencia de Nash - Sutcliffe NSE (Efficiency EF).....	35
2.1.9.5.	Coefficiente de determinación CD (Coefficient of Determination).....	36
2.1.9.6.	Sesgo porcentual BIAS (Model Bias CR1) .....	37
2.1.9.7.	Bondad de regresión lineal $R^2$ .....	37
2.1.10.	Sensibilidad de parámetros WEAP .....	38
2.1.11.	Modelo de Montecarlo .....	39
2.2.	Marco legal y/o normativo.....	40
2.2.1.	Constitución política del estado plurinacional de Bolivia .....	40
2.2.2.	Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia.....	41
2.3.	Situación Actual del arte .....	41
<b>3.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>43</b>
3.1.	Tipo y diseño de la investigación.....	43
3.2.	Universo de trabajo y muestra .....	43
3.3.	Definición de variables e indicadores .....	44
3.3.1.	Variables .....	44
3.3.2.	Indicadores.....	45
3.4.	Instrumentos de investigación.....	45

3.5.	Descripción del desarrollo del proyecto.....	46
3.6.	Diseño técnico y metodologías para el análisis de la información .....	46
3.6.1.	Enfoque de la investigación .....	46
3.6.2.	Técnica de recolección de datos.....	47
3.6.3.	Técnica de procesamiento de datos.....	47
3.6.4.	Herramienta de procesamiento de datos .....	47
3.7.	Limitaciones.....	47
<b>4.</b>	<b>DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>49</b>
4.1.	Flujograma de la investigación .....	49
4.2.	Obtención y procesamiento de las precipitaciones .....	50
4.2.1.	Obtención de datos de pluviométricos .....	50
4.2.2.	Llenado de vacíos mensuales.....	52
4.2.2.1.	Enfoque de regresión lineal múltiple .....	52
4.2.3.	Distribución espacial de precipitaciones.....	55
4.2.4.	Producto satelital TRMM .....	56
4.2.4.1.	Procesamiento de la imagen TRMM .....	56
4.2.5.	Producto satelital TRMM-Modificado .....	57
4.2.6.	Producto satelital CHIRPS.....	59
4.2.6.1.	Procesamiento de la imagen CHIRPS.....	59
4.2.7.	Grilla GMET .....	59
4.2.7.1.	Implementación del GMET al modelo WEAP .....	60
4.3.	Implementación del modelo WEAP .....	61
4.3.1.	Modelo WEAP.....	61
4.3.2.	Precipitación .....	61
4.3.3.	Evapotranspiración.....	61
4.3.4.	Uso de suelo y cobertura de suelo.....	62
4.3.5.	Información Hidrométrica.....	65
4.3.6.	Calibración y Validación .....	65
4.4.	Implementación de precipitaciones satelitales al modelo WEAP.....	66
4.5.	Aplicación de la metodología de Montecarlo en los parámetros de calibración del modelo WEAP .....	66
4.6.	Escenarios .....	68

4.6.1.	Escenario 1: Factor de corrección global.....	68
4.6.2.	Escenario 2: Factor de corrección mensual.....	68
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS, DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
5.1.	Resultado del análisis de precipitaciones.....	69
5.1.1.	Análisis a nivel subcuenca .....	69
5.1.1.1.	Análisis de precipitaciones en la subcuenca Obrajes.....	69
5.1.1.2.	Gráficas de precipitaciones acumuladas .....	74
5.1.1.3.	Medias Mensuales Multianuales.....	75
5.1.2.	Análisis a nivel cuenca.....	76
5.1.2.1.	Gráficas de precipitaciones acumuladas y rectas doble masa.....	80
5.1.2.2.	Análisis de precipitaciones bajas, medias y altas.....	81
5.1.3.	Estadística obtenida de precipitaciones a nivel subcuencas.....	82
5.1.4.	Estadística obtenida de precipitaciones a nivel cuenca.....	83
5.2.	Resultado del análisis de caudales .....	83
5.2.1.	Calibración del modelo WEAP.....	83
5.2.2.	Validación del modelo WEAP.....	85
5.2.3.	Modelación de caudales con precipitaciones satelitales .....	87
5.2.3.1.	Comparación de caudales satelitales con caudales medidos.....	87
5.2.3.2.	Comparación de caudales satelitales con caudales modelados.....	90
5.2.4.	Estadística obtenida de caudales .....	92
5.2.5.	Coeficientes de escurrimiento.....	93
5.2.5.1.	Coeficientes de escurrimiento estimados.....	93
5.2.5.2.	Gráficas de coeficientes de escurrimiento .....	94
5.3.	Metodología de Montecarlo y análisis de sensibilidad .....	96
5.3.1.	Análisis de sensibilidad de los parámetros de calibración.....	96
5.3.2.	Rangos y niveles de sensibilidad .....	100
5.4.	Escenario 1: Factor de corrección global.....	101
5.4.1.	Análisis de precipitaciones con factor de corrección global.....	101
5.4.1.1.	Gráficas de precipitaciones acumuladas .....	101
5.4.1.2.	Factores de corrección obtenidos.....	102
5.4.2.	Análisis de caudales modelados con factor de corrección global.....	104
5.4.2.1.	Comparación de caudales satelitales (escenario 1) con caudales medidos.....	104
5.4.2.2.	Comparación de caudales satelitales (escenario 1) con caudales modelados .....	105
5.5.	Escenario 2: Factor de corrección mensual.....	107

5.5.1.	Análisis de precipitaciones con factor de corrección mensual .....	107
5.5.1.1.	Gráficas de medias mensuales multianuales de precipitaciones .....	107
5.5.1.2.	Factores de corrección mensual obtenidos.....	108
5.5.2.	Análisis de caudales modelados con factor de corrección mensual.....	110
5.5.2.1.	Comparación de caudales satelitales (escenario 2) con caudales medidos .....	110
5.5.2.2.	Comparación de caudales satelitales (escenario 2) con caudales modelados .....	112
5.6.	Estadística y comparación de escenarios 1 y 2 .....	113
5.6.1.	Estadística obtenida de precipitaciones para escenarios 1 y 2 .....	113
5.6.2.	Estadística obtenida de caudales para escenarios 1 y 2 .....	116
5.6.3.	Factores de corrección para el caso especial de la cuenca Sella Quebrada .....	117
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>119</b>
6.1.	Conclusiones .....	119
6.2.	Recomendaciones.....	121
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>122</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>125</b>
	Anexo A: Análisis de serie cronológica de precipitaciones reconstruida con HEC-4 .....	125
	Anexo B: Discusión y observaciones acerca de información de caudales observados.....	134
	Anexo C: Análisis de precipitaciones .....	138
	Anexo D: Modelación de caudales .....	146
	Anexo E: Coeficientes de escurrimiento.....	154
	Anexo F: Análisis de sensibilidad del sesgo porcentual BIAS .....	158
	Anexo G: Análisis de precipitaciones y modelación de caudales escenario 1 .....	162
	Anexo H: Análisis de precipitaciones y modelación de caudales escenario 2.....	172
	Anexo I: Carta tutor de proyecto de Ingeniería Civil II .....	178

## Índice de Figuras

Figura 1.2-1 Ubicación de la cuenca Alta del Rio Guadalquivir (Espejo Rospigliossi, 2016). ..2	
Figura 1.2-2 Mapa de relieve de la Cuenca Alta del Rio Guadalquivir y ubicación de estaciones hidrometricas. ....5	
Figura 2.1-1 Radar Meteorológico en el valle de Uriondo, Tarija. .... 11	
Figura 2.1-2 Órbita Geoestacionaria (Franz, 2015)..... 13	
Figura 2.1-3 Órbita Polar (Franz, 2015)..... 14	
Figura 2.1-4 Imagen TRMM con la altura de las columnas de lluvia en el huracán Irene, 15 de agosto de 2005, 5.43 UTC, (Wikipedia, 2019)..... 15	
Figura 2.1-5 Sensores del satélite TRMM, (bloklet, 2002)..... 15	
Figura 2.1-6 Grillas de precipitación mensual, temperatura media y delta de temperatura (gmet.sei-us, 2018). .... 19	
Figura 2.1-7 Estaciones de validación para la grilla del balance hídrico nacional 2016, (BHSB, 2018)..... 20	
Figura 2.1-8 Mapas de precipitación anual media en los dos períodos de los balances hídricos nacionales de 1968-1982 y 1980-2014, (gmet.sei-us, 2018)..... 20	
Figura 2.1-9 Flujo de la elaboración de la grilla GMET (gmet.sei-us, 2018). .... 21	
Figura 2.1-10 Representación simplificada de la resistencia superficial (total) y de la resistencia aerodinámica al flujo de vapor de agua (Allen, 2006). .... 22	
Figura 2.1-11 Características del cultivo hipotético de referencia, (Allen, 2006). .... 24	
Figura 2.1-12 Interfaz gráfica del modelo hidrológico WEAP, (Yates et al., 2005)..... 27	
Figura 2.1-13 Esquema para dos reservorios, 1 y 2. Esquema a partir de (Yates et al., 2005). 29	
Figura 2.1-14 Modelo Montecarlo (Share, 2019)..... 39	
Figura 4.1-1 Flujo de la metodología de la investigación. .... 49	
Figura 4.2-1 Ubicación de estaciones hidrometereologicas respecto a la cuenca Alta del Rio Guadalquivir. .... 51	
Figura 4.2-2 Estimación de la precipitación media de la cuenca Obrajes por el programa HYDRACCESS, Diciembre 2018..... 55	
Figura 4.2-3 Mapa de la cuenca del Alta del Rio Guadalquivir y pixeles TRMM de lluvia acumulada mensual, Enero 1998..... 57	
Figura 4.2-4 Mapa de la cuenca del Alta del Rio Guadalquivir y pixeles TRMM-Modificado de lluvia acumulada mensual, Enero 1998..... 58	
Figura 4.2-5 Obtención de precipitaciones CHIRPS para la cuenca Obrajes, periodo 1991-2019, por el programa RStudio. .... 59	
Figura 4.2-6 Pantalla de selección del programa WEAP para insertar los datos GMET. .... 60	
Figura 4.3-1 Esquema del modelo hidrológico en WEAP cuenca Alta del Rio Guadalquivir.. 61	
Figura 4.3-2 Evapotranspiración de referencia en las subcuencas Canasmoro, Obrajes y Sella Quebrada..... 62	
Figura 4.3-3 Mapa de tipo de suelo de la FAO (BHSB 2018). .... 63	
Figura 4.3-4 Clasificación de ESA-CCI-2010 para Bolivia con 36 clases de cobertura vegetal a una resolución de 300 m..... 64	

Figura 4.5-1 Metodología de uso de la planilla Excel programada con Visual Basic.....	67
Figura 5.1-1 Comparación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y TRMM, Cuenca Obrajes, Periodo 1998-2019.....	69
Figura 5.1-2 Correlación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y TRMM, Cuenca Obrajes, Periodo 1998-2018.....	70
Figura 5.1-3 Recta de homogeneidad, doble masa con precipitaciones mensuales medidas en tierra y TRMM, Cuenca Obrajes, Periodo 1998-2018. ....	70
Figura 5.1-4 Comparación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y TRMM-Modificado, Cuenca Obrajes, Periodo 1998-2019. ....	70
Figura 5.1-5 Correlación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y TRMM-Modificado, Cuenca Obrajes, Periodo 1998-2018.....	71
Figura 5.1-6 Recta de homogeneidad, doble masa con precipitaciones mensuales medidas en tierra y TRMM-Modificado, Cuenca Obrajes, Periodo 1998-2018. ....	71
Figura 5.1-7 Comparación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y CHIRPS, Cuenca Obrajes, Periodo 1981-2019.....	71
Figura 5.1-8 Correlación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y CHIRPS, Cuenca Obrajes, Periodo 1981-2018.....	72
Figura 5.1-9 Recta de homogeneidad, doble masa con precipitaciones mensuales medidas en tierra y CHIRPS, Cuenca Obrajes, Periodo 1981-2018. ....	72
Figura 5.1-10 Comparación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y GMET, Cuenca Obrajes, Periodo 1980-2016.....	72
Figura 5.1-11 Correlación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y GMET, Cuenca Obrajes, Periodo 1980-2016.....	73
Figura 5.1-12 Recta de homogeneidad, doble masa con precipitaciones mensuales medidas en tierra y GMET, Cuenca Obrajes, Periodo 1980-2016. ....	73
Figura 5.1-13 Precipitación mensual acumulada, Cuenca Canasmoro, Período 1998-2016.....	74
Figura 5.1-14 Precipitación mensual acumulada, Cuenca Obrajes, Período 1998-2016. ....	74
Figura 5.1-15 Precipitación mensual acumulada, Cuenca Sella Quebrada, Período 1998-2016. ....	75
Figura 5.1-16 Media Mensual Multianual, Cuenca Canasmoro.....	76
Figura 5.1-17 Media Mensual Multianual, Cuenca Obrajes. ....	76
Figura 5.1-18 Media Mensual Multianual, Cuenca Sella Quebrada. ....	76
Figura 5.1-19 Comparación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y TRMM, Cuenca Alta del Guadalquivir, Periodo 1998-2019. ....	77
Figura 5.1-20 Correlación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y TRMM, Cuenca Alta del Guadalquivir, Periodo 1998-2018. ....	77
Figura 5.1-21 Comparación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y TRMM-Modificado, Cuenca Alta del Guadalquivir, Periodo 1998-2019.....	77
Figura 5.1-22 Correlación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y TRMM-Modificado, Cuenca Alta del Guadalquivir, Periodo 1998-2018.....	78
Figura 5.1-23 Comparación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y CHIRPS, Cuenca Alta del Guadalquivir, Periodo 1981-2019. ....	78

Figura 5.1-24 Correlación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y CHIRPS, Cuenca Alta del Guadalquivir, Periodo 1981-2018. ....	78
Figura 5.1-25 Comparación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y GMET, Cuenca Alta del Guadalquivir, Periodo 1980-2016. ....	79
Figura 5.1-26 Correlación de precipitaciones mensuales medidas en Tierra y GMET, Cuenca Alta del Guadalquivir, Periodo 1980-2016. ....	79
Figura 5.1-27 Precipitaciones acumuladas, Cuenca Alta del Rio Guadalquivir, Período 1998-2016. ....	80
Figura 5.1-28 Recta de homogeneidad, doble masa con precipitaciones medidas y fuentes satelitales, Cuenca Alta del Rio Guadalquivir, Período 1998-2016. ....	80
Figura 5.1-29 Gráfica de precipitaciones ordenados de mayor a menor en una escala semi logarítmica. Período de comparación 1998-2018, Cuenca Alta del Rio Guadalquivir. ....	81
Figura 5.1-30 Gráfica de precipitaciones ordenados de mayor a menor en una escala semi logarítmica. Período de comparación 1981-2016, Cuenca Alta del Rio Guadalquivir. ....	81
Figura 5.2- 1 Hidrograma de calibración para la Cuenca Canasmoro, periodo 1978 – 1986. ..	84
Figura 5.2-2 Hidrograma de calibración para la Cuenca Obrajes, periodo 1978 – 1986. ....	84
Figura 5.2-3 Hidrograma de calibración para la Cuenca Sella Quebrada, periodo 1978 – 1986. ....	84
Figura 5.2-4 Hidrograma de Validación para la Cuenca Canasmoro, periodo 1987 – 1990. ....	86
Figura 5.2-5 Hidrograma de Validación para la Cuenca Obrajes, periodo 1987 – 1990. ....	86
Figura 5.2-6 Hidrograma de Validación para la Cuenca Sella Quebrada, periodo 1987 – 1990. ....	86
Figura 5.2-7 Comparación de caudales medidos en tierra (gauge), caudal modelado precipitaciones medida en tierra y caudal modelado con precipitaciones CHIRPS, Cuenca Obrajes, Periodo 1981-1990. ....	88
Figura 5.2-8 Comparación de caudales acumulados para el caudal modelado con precipitaciones CHIRPS, Cuenca Obrajes, Período 1981-1990. ....	88
Figura 5.2-9 Gráfica de caudales ordenados de mayor a menor en una escala semi logarítmica, Cuenca Obrajes (CHIRPS), Período de comparación 1981-1990. ....	88
Figura 5.2-10 Comparación de caudales medidos en tierra (gauge), caudal modelado precipitaciones medida en tierra y caudal modelado con precipitaciones CHIRPS, Cuenca Obrajes, Periodo 1980-1990. ....	89
Figura 5.2-11 Comparación de caudales acumulados para el caudal modelado con precipitaciones GMET, Cuenca Obrajes, Período 1980-1990. ....	89
Figura 5.2-12 Gráfica de caudales ordenados de mayor a menor en una escala semi logarítmica, Cuenca Obrajes (GMET), Período de comparación 1980-1990, ....	89
Figura 5.2-13 Comparación de caudales modelados Tierra y modelados TRMM, Cuenca Obrajes, Periodo 1998-2019. ....	90
Figura 5.2-14 Comparación de caudales modelados Tierra y TRMM-Modificado, Cuenca Obrajes, Periodo 1998-2019. ....	90
Figura 5.2-15 Comparación de caudales modelados Tierra y modelados CHIRPS, Cuenca Obrajes, Periodo 1981-2019. ....	91

Figura 5.2-16 Comparación de caudales modelados Tierra y modelados GMET, Cuenca Obrajes, Período 1980-2016.....	91
Figura 5.2-17 Recta de homogeneidad, doble masa de caudales modelados con datos tierra y caudales modelados de fuentes satelitales, Cuenca Obrajes, Período 1998-2016.....	91
Figura 5.2-18 Caudal medio mensual multianual de caudales modelados y caudales observados, Cuenca Obrajes.....	92
Figura 5.2-19 Gráfica de la pendiente de los coeficientes de escurrimientos, Observado y Modelado (Tierra), Cuenca Obrajes, Período 1978 - 1990. ....	94
Figura 5.2-20 Gráfica de la pendiente de los coeficientes de escurrimientos, Modelado (Tierra) y fuente satelital TRMM, Cuenca Obrajes, Período 1998 - 2019. ....	95
Figura 5.2-21 Gráfica de la pendiente de los coeficientes de escurrimientos, Modelado (Tierra) y fuente satelital TRMM-Modificado, Cuenca Obrajes, Período 1998 - 2019. ....	95
Figura 5.2-22 Gráfica de la pendiente de los coeficientes de escurrimientos, Observado, Modelado (Tierra) y fuente satelital CHIRPS, Cuenca Obrajes, Período 1981 - 1990.....	95
Figura 5.2-23 Gráfica de la pendiente de los coeficientes de escurrimientos, Observado, Modelado (Tierra) y Grilla GMET, Cuenca Obrajes, Período 1980 - 1990.....	96
Figura 5.3-1 Gráfica de sensibilidad NASH vs DC, a nivel estación hidrométrica. ....	96
Figura 5.3-2 Gráfica de sensibilidad NASH vs DWC, a nivel estación hidrométrica. ....	97
Figura 5.3-3 Gráfica de sensibilidad NASH vs PFD para la cobertura de vegetación (Grassland), a nivel estación hidrométrica.....	97
Figura 5.3-4 Gráfica de sensibilidad NASH vs PFD para la cobertura de vegetación (Shrubland), a nivel estación hidrométrica.....	97
Figura 5.3-5 Gráfica de sensibilidad NASH vs RZC para la cobertura de suelo (SANDY CLAY LOAM), a nivel estación hidrométrica.....	98
Figura 5.3-6 Gráfica de sensibilidad NASH vs RRF para la cobertura de vegetación (Grassland), a nivel estación hidrométrica.....	98
Figura 5.3-7 Gráfica de sensibilidad NASH vs RRF para la cobertura de vegetación (Shrubland), a nivel estación hidrométrica.....	98
Figura 5.3-8 Gráfica de sensibilidad NASH vs SWC para la cobertura (SANDY CLAY LOAM_Grassland), a nivel estación hidrométrica.....	99
Figura 5.3-9 Gráfica de sensibilidad NASH vs SWC para la cobertura (SANDY CLAY LOAM_Shrubland), a nivel estación hidrométrica. ....	99
Figura 5.3-10 Gráfica de sensibilidad NASH vs KC, a nivel estación hidrométrica. ....	99
Figura 5.4-1 Precipitación acumulada, con curva TRMM afectado por factor de corrección global, Cuenca Obrajes, Período 1998-2018.....	101
Figura 5.4-2 Precipitación acumulada, con curva TRMM-Modificado afectado por factor de corrección global, Cuenca Obrajes, Período 1998-2018.....	101
Figura 5.4-3 Precipitación acumulada, con curva CHIRPS afectado por factor de corrección global, Cuenca Obrajes, Período 1981-2018.....	102
Figura 5.4-4 Precipitación acumulada, con curva GMET afectado por factor de corrección mensual, Cuenca Obrajes, Período 1980-2016.....	102
Figura 5.4-5 Factores de corrección global para la cuenca Alta del Rio Guadalquivir.....	103



Figura 5.4-6 Factores de corrección global para las subcuencas Canasmoro, Obrajes y Sella Quebrada.....	103
Figura 5.4-7 Comparación de caudales acumulados para el caudal modelado con precipitaciones CHIRPS Escenario 1, Cuenca Obrajes, Periodo 1981 – 1990. ....	104
Figura 5.4-8 Hidrograma de comparación para la fuente satelital CHIRPS Escenario 1, Cuenca Obrajes, Periodo 1981 – 1990. ....	104
Figura 5.4-9 Comparación de caudales acumulados para el caudal modelado con precipitaciones GMET Escenario 1, Cuenca Obrajes, Periodo 1980 – 1990. ....	105
Figura 5.4-10 Hidrograma de comparación para la fuente satelital GMET Escenario 1, Cuenca Obrajes, Periodo 1980 – 1990. ....	105
Figura 5.4-11 Recta de homogeneidad, doble masa de caudales modelados con datos tierra y caudales modelados de fuentes satelitales (Escenario 1), Cuenca Obrajes, Período 1998-2016. ....	106
Figura 5.4-12 Curva de caudales modelados con datos tierra acumulados y caudales modelados de fuentes satelitales acumulados (Escenario 1), Cuenca Obrajes, Período 1998-2016. ....	106
Figura 5.4-13 Media mensual multianual de caudales para el Escenario 1, Cuenca Obrajes. ....	106
Figura 5.5-1 Corrección de la media mensual multianual de las fuentes satelitales (Escenario 2), Cuenca Alta del Guadalquivir. ....	107
Figura 5.5-2 Corrección de la media mensual multianual de las fuentes satelitales (Escenario 2), Cuenca Canasmoro. ....	107
Figura 5.5-3 Corrección de la media mensual multianual de la fuentes satelitales (Escenario 2), Cuenca Obrajes.....	108
Figura 5.5-4 Corrección de la media mensual multianual de la fuente GMET (Escenario 2), Cuenca Sella Quebrada.....	108
Figura 5.5-5 Comparación de caudales acumulados para el caudal modelado con precipitaciones CHIRPS Escenario 1, Cuenca Obrajes, Periodo 1981 – 1990. ....	110
Figura 5.5-6 Hidrograma de comparación para la fuente satelital CHIRPS Escenario 2, Cuenca Obrajes, Periodo 1981 – 1990. ....	111
Figura 5.5-7 Comparación de caudales acumulados para el caudal modelado con precipitaciones GMET Escenario 2, Cuenca Obrajes, Periodo 1980 – 1990. ....	111
Figura 5.5-8 Hidrograma de comparación para la fuente satelital GMET Escenario 2, Cuenca Obrajes, Periodo 1980 – 1990. ....	111
Figura 5.5-9 Recta de homogeneidad, doble masa de caudales modelados con datos tierra y caudales modelados de fuentes satelitales (Escenario 2), Cuenca Obrajes, Período 1998-2016. ....	112
Figura 5.5-10 Curva de caudales modelados con datos tierra acumulados y caudales modelados de fuentes satelitales acumulados (Escenario 2), Cuenca Obrajes, Período 1998-2016. ....	112
Figura 5.5-11 Media mensual multianual de caudales para el Escenario 2, Cuenca Obrajes. ....	113

## Índice de Tablas

Tabla 1.2-1 Parámetros morfométricos según subcuencas - parte 1, (Espejo Rospigliossi, 2016). .....	4
Tabla 1.2-2 Parámetros morfométricos según subcuencas - parte 2, (Espejo Rospigliossi, 2016). .....	4
Tabla 2.1-1 Bandas del espectro electromagnético para la estimación de la lluvia de satélite: sensor y satélite en el espectro visible e infrarrojo (color e infrarrojo), sensor y satélite en el espectro de las microondas activas (color azul claro), (Ramos, 2013)......	12
Tabla 2.1-2 Valores referenciales de profundidad radicular, (Soria Cespedes, 2016). .....	31
Tabla 2.1-3 Valores referenciales de CRH en mm/m, (Soria Cespedes, 2016). .....	31
Tabla 2.1-4 Estimaciones de índices de área foliar LAI. (MMAyA, 2016). .....	32
Tabla 2.1-5 Estimaciones de RZC para diferentes clases texturales, (DHI, 2009). .....	33
Tabla 2.1-6 Rangos referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe (Molnar, 2011). .....	36
Tabla 2.1-7 Valores referenciales del sesgo porcentual de BIAS (Moriassi, et al., 2007). .....	37
Tabla 2.1-8 Sensibilidad del modelo reportada en la literatura, (MMAyA & VRHR, 2016). ...	38
Tabla 2.1-9 Sensibilidad de parámetros según LHUMSS, (Montenegro & Muñoz, 2017). .....	39
Tabla 4.2-1 Disponibilidad de datos de precipitación. ....	50
Tabla 4.2-2 Información general de los pluviómetros en estudio, (SENAMHI 2019). .....	51
Tabla 4.2-3 Disponibilidad inicial de información pluviométrica, periodo 1976-1997, (SENAMHI 2019). .....	52
Tabla 4.2-4 Disponibilidad inicial de información pluviométrica, periodo 1998-2018, (SENAMHI 2019). .....	52
Tabla 4.2-5 Agrupación de estaciones por zonificación pluviométrica, para correr el programa HEC-4. ....	54
Tabla 4.2-6 Agrupación de estaciones por elevación sobre el nivel del mar, para correr el programa HEC-4. ....	54
Tabla 4.2-7 Información pluviométrica con datos rellenados, periodo 1976-1997.....	54
Tabla 4.2-8 Información pluviométrica con datos rellenados, periodo 1998-2018.....	55
Tabla 4.3-1 Clasificación de suelos y cobertura vegetal en la cuenca de estudio. ....	65
Tabla 4.3-2 Período de tiempo de datos hidrométricos para la calibración y validación del modelo. ....	65
Tabla 4.4-1 Disponibilidad de tiempo de precipitaciones y caudales. ....	66
Tabla 4.5-1 Rangos de Parámetros referenciales adoptados en el análisis de sensibilidad de los parámetros de calibración en el modelo WEAP, según diversos autores.....	67
Tabla 5.1-1 Resumen del cálculo de $R^2$ de las precipitaciones satelitales respecto a las precipitaciones observadas, subcuencas.....	74
Tabla 5.1-2 Resumen del cálculo del $R^2$ de las <b>precipitaciones satelitales</b> respecto a las <b>precipitaciones observadas</b> , Cuenca Alta del Rio Guadalquivir.....	79
Tabla 5.1-3 Estadística obtenida de la comparación de las <b>fuentes satelitales</b> respecto a las <b>observadas</b> . Cuenca Canasmoro.....	82
Tabla 5.1-4 Estadística obtenida de la comparación de las <b>fuentes satelitales</b> respecto a las <b>observadas</b> . Cuenca Obrajes.....	82

Tabla 5.1-5 Estadística obtenida de la comparación de las <b>fuentes satelitales</b> respecto a las <b>observadas</b> . Cuenca Sella Quebrada. ....	82
Tabla 5.1-6 Estadística obtenida de la comparación de las <b>fuentes satelitales</b> respecto a las <b>observadas</b> . Cuenca Alta del Rio Guadalquivir. ....	83
Tabla 5.2-1 Estadística obtenida de la <b>calibración del modelo</b> en el período 1978-1986. ....	85
Tabla 5.2-2 Estadística obtenida de la <b>validación del modelo</b> en el período 1987-1990. ....	87
Tabla 5.2-3 Estadística obtenida de la comparación entre caudales <b>medidos en tierra</b> respecto a caudales modelados con precipitaciones <b>satelitales</b> . Cuenca Canasmoro. ....	92
Tabla 5.2-4 Estadística obtenida de la comparación entre caudales <b>medidos en tierra</b> respecto a caudales modelados con precipitaciones <b>satelitales</b> . Cuenca Obrajes. ....	92
Tabla 5.2-5 Estadística obtenida de la comparación entre caudales <b>medidos en tierra</b> respecto a caudales modelados con precipitaciones <b>satelitales</b> . Cuenca Sella Quebrada. ....	93
Tabla 5.2-6 Coeficientes de escurrimiento por subcuencas, de caudal observado (Gauge) relacionado con precipitaciones. ....	94
Tabla 5.2-7 Coeficientes de escurrimiento por subcuencas, de caudal modelados (Runoff) relacionado con precipitaciones. ....	94
Tabla 5.3-1 Rangos para la clasificación de la sensibilidad (de modelos a paso mensual). ....	100
Tabla 5.3-2 Valores de sensibilidad de los parámetros de calibración del modelo hidrológicos WEAP. ....	100
Tabla 5.5-1 Coeficientes de corrección mensuales para la cuenca alta del Guadalquivir. ....	109
Tabla 5.5-2 Coeficientes de corrección mensuales para la subcuenca Canasmoro. ....	109
Tabla 5.5- 3 Coeficientes de corrección mensuales para la subcuenca Obrajes. ....	109
Tabla 5.5-4 Coeficientes de corrección mensuales para la subcuenca Sella Quebrada. ....	110
Tabla 5.6-1 Estadística obtenida de la comparación entre precipitaciones <b>medidas en tierra</b> respecto a <b>precipitaciones</b> de fuentes <b>satelitales TRMM y TRMM-Modificado</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Alta del Guadalquivir</b> . ....	113
Tabla 5.6-2 Estadística obtenida de la comparación entre precipitaciones <b>medidas en tierra</b> respecto a <b>precipitaciones</b> de fuentes <b>satelital CHIRPS y la grilla GMET</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Alta del Guadalquivir</b> . ....	114
Tabla 5.6-3 Estadística obtenida de la comparación entre precipitaciones <b>medidas en tierra</b> respecto a <b>precipitaciones</b> de fuentes <b>satelitales TRMM y TRMM-Modificado</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Canasmoro</b> . ....	114
Tabla 5.6-4 Estadística obtenida de la comparación entre precipitaciones <b>medidas en tierra</b> respecto a <b>precipitaciones</b> de fuentes <b>satelital CHIRPS y la grilla GMET</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Canasmoro</b> . ....	114
Tabla 5.6-5 Estadística obtenida de la comparación entre precipitaciones <b>medidas en tierra</b> respecto a <b>precipitaciones</b> de fuentes <b>satelitales TRMM y TRMM-Modificado</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Obrajes</b> . ....	115

Tabla 5.6-6 Estadística obtenida de la comparación entre precipitaciones <b>medidas en tierra</b> respecto a <b>precipitaciones</b> de fuentes <b>satelital CHIRPS y la grilla GMET</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Obrajes.</b> .....	115
Tabla 5.6-7 Estadística obtenida de la comparación entre precipitaciones <b>medidas en tierra</b> respecto a <b>precipitaciones</b> de fuentes <b>satelitales TRMM y TRMM-Modificado</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Sella Quebrada.</b> .....	115
Tabla 5.6-8 Estadística obtenida de la comparación entre precipitaciones <b>medidas en tierra</b> respecto a <b>precipitaciones</b> de fuentes <b>satelital CHIRPS y la grilla GMET</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Sella Quebrada.</b> .....	116
Tabla 5.6-9 Estadística obtenida de la comparación entre caudales <b>observados en tierra</b> respecto a <b>caudales modelados</b> con fuentes <b>satelital CHIRPS y la grilla GMET</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Canasmoro.</b> .....	116
Tabla 5.6-10 Estadística obtenida de la comparación entre caudales <b>observados en tierra</b> respecto a <b>caudales modelados</b> con fuentes <b>satelital CHIRPS y la grilla GMET</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Obrajes.</b> .....	116
Tabla 5.6-11 Estadística obtenida de la comparación entre caudales <b>observados en tierra</b> respecto a <b>caudales modelados</b> con fuentes <b>satelital CHIRPS y la grilla GMET</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor mensual (Esc 2). <b>Cuenca Sella Quebrada.</b> .....	117
Tabla 5.6-12 Estadística obtenida de la comparación entre caudales <b>observados en tierra</b> respecto a <b>caudales modelados</b> con fuentes <b>satelital CHIRPS y la grilla GMET</b> sin corregir (Sc), corregidas con factor global (Esc 1) y corregidas con factor global obtenido del sesgo BIAS de caudales (Esc 1c). <b>Cuenca Sella Quebrada.</b> .....	118

## Lista de abreviaciones

BHG	Balance Hídrico integral para la cuenca del rio Guadalquivir
BHSB	Balance Hídrico Superficial de Bolivia
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station
DW	Conductividad Profunda
DWC	Capacidad de Almacenamiento de Agua en la Zona Profunda
FAO	Food and Agriculture Organization
GMET	Gridded Meteorological Ensemble Tool
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
IR	Infrarrojo
JAXA	Japan Aerospace and Exploration Agency
KC	Coefficiente de Cultivo
MMayA	Ministerio de Medio Ambiente y Agua
MW	Microondas Activas y Pasivas
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NSE	Coefficiente de Eficiencia del Modelo Nash-Sutcliffe
Pcp	Precipitación
PDF	Dirección Preferencial del Flujo
PR	Precipitación Radar
R <sup>2</sup>	Coefficiente de bondad de regresión lineal o correlación
RMSE	Formula Error Cuadrático Medio
RRF	Factor de Resistencia a la Escorrentía
RVE	Error Relativo Volumétrico
RZC	Conductividad en Zona de Raíces
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SWC	Capacidad de Almacenamiento de Agua en la Zona de Raíces
TMI	TRMM Microwave Imager
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
TRMM-Modificado	Tropical Rainfall Measuring Mission-WordClim
VIRS	Visible and Infrared Radiometer System
VIS	Radiancia en el Espectro Visible
WEAP	Water Evaluation And Planning