

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



**“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL INCENDIO DE LA CORDILLERA  
DE SAMA EN LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS  
SUPERFICIALES”**

**APLICACIÓN PRÁCTICA: CUENCA RÍO LA VICTORIA**

**Por:**

**CARLOS JAVIER GALEAN RAMIREZ**

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

**SEMESTRE I-2024**

**TARIJA - BOLIVIA**

## **DEDICATORIA**

A mis padres Carlos Alberto Galean Ontiveros (†) y Rosario Ramírez Borda, hermanos Joaquín Galean y Matías Galean, dedicarles este proyecto y agradecerles de todo corazón, a pesar de los distintos obstáculos y problemas, estuvieron ahí dándome un apoyo incondicional en cuanto a la realización del presente trabajo.

Les dedico este logro más en mi vida querida familia.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesaria para llevar a cabo este proyecto. Sin su guía y bendiciones, este logro no habría sido posible.

Agradezco también a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, por proporcionarme la oportunidad de formarme académicamente y por ser una fuente constante de apoyo y recursos durante todos estos años de estudio. La calidad educativa y el compromiso de esta institución han sido fundamentales para mi desarrollo profesional y personal.

## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	1
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	5
1.6. ALCANCE.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. MARCO NORMATIVO.....	7
2.1.1. Normativa y su relación con la Reserva Biológica Cordillera Sama (RBCS).....	7
2.2. MARCO REFERENCIAL.....	9
2.2.1. Aspectos generales de incendios forestales.....	9
2.2.1.1. Influencia de los incendios sobre la escorrentía superficial.....	9
2.2.1.2. Los incendios forestales.....	9
2.2.1.3. Clasificación de incendios.....	10
2.2.1.4. Como afecta el incendio a la cobertura vegetal y cuánto tarda en recuperar.....	11
2.2.2. Fundamentos básicos de la hidrología.....	12
2.2.2.1. Balance Hídrico.....	12
2.2.2.2. Ciclo hidrológico.....	12
2.2.2.2.1. Precipitación.....	13
2.2.2.2.2. Evapotranspiración.....	13
2.2.2.2.3. Escorrentía.....	14
2.2.2.2.4. Infiltración.....	15
2.2.3. Modelo matemático.....	16
2.2.4. Modelo hidrológico.....	16
2.2.5. Clasificación de los modelos.....	16
2.2.5.1. Modelación hidrológica.....	16
2.3. FUNDAMENTOS DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	17
2.3.1. Descripción del Modelo WEAP.....	17
2.3.1.1. Características generales de WEAP.....	17
2.3.1.2. Capacidad de un modelo WEAP.....	17
2.3.1.3. Métodos de simulación en procesos hidrológicos.....	18
2.3.1.4. Modelo de escurrimiento de lluvia-método de la humedad del suelo.....	19
2.3.1.4.1. Escorrentía superficial.....	20
2.3.1.4.2. Escorrentía directa (solo si $z_1 > 100\%$ ).....	20
2.3.1.4.3. Escorrentía subsuperficial.....	21
2.3.1.4.4. Percolación.....	21
2.3.1.4.5. Flujo base.....	21
2.3.1.4.6. Ecuación del tanque superior.....	21
2.3.1.4.7. Ecuación del tanque inferior.....	23
2.3.1.5. Parámetros del modelo hidrológico (SMM).....	25

2.3.1.5.1. Sensibilidad esperada de los factores del modelo hidrológico. ....	25
2.3.1.5.2. Coeficiente de cultivo Kc. ....	26
2.3.1.5.3. Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces (Sw). ....	28
2.3.1.5.4. Conductividad en la zona de raíces (Ks). ....	29
2.3.1.5.5. Factor de resistencia a la escorrentía (RRF). ....	30
2.3.1.5.6. Dirección preferencial del flujo (f).....	32
2.3.1.5.7. Conductividad en la zona profunda (Kd). ....	32
2.3.1.5.8. Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda Dw (mm).....	33
2.3.1.5.9. Valores referenciales considerados en la literatura. ....	35
2.3.1.6. Calibración del Modelo. ....	38
2.3.1.6.1. Aspectos Metodológicos de la Calibración del Modelo.....	39
2.3.1.6.2. Calibración de cuencas aportantes o en zonas de régimen natural. ....	39
2.3.1.6.3. Calibración de cuencas intermedias. ....	40
2.3.1.6.4. Medidas de bondad de ajuste. ....	41
2.3.1.7. Uso del modelo, creación de escenarios.....	43
2.3.1.7.1. Escenarios de crecimiento o cambio en la población.....	43
2.3.1.7.2. Escenarios de uso de suelo.....	43
2.3.1.7.3. Escenarios de clima. ....	44
2.4. MARCO METODOLÓGICO. ....	44
2.4.1. Proceso de aplicación del Modelo. ....	44
2.4.1.1. Definición del estudio. ....	44
2.4.1.2. Búsqueda y análisis de información.....	44
2.4.1.3. Desarrollo del modelo. ....	45
2.4.1.4. Calibración.....	45
2.4.1.5. Uso del modelo, generación de escenarios. ....	45
CAPÍTULO III: APLICACIÓN PRÁCTICA. ....	46
3. DESARROLLO DEL MODELO.....	46
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	46
3.1.1. Ubicación y superficie de cuenca en estudio.....	46
3.1.2. Características generales de la cuenca La Victoria.....	46
3.2. ETAPAS PRELIMINARES.....	48
3.2.2. Selección escalas y periodos de estudio.....	48
3.2.2.1. Escala temporal.....	48
3.2.2.2. Escala espacial. ....	48
3.2.2.3. Periodos de estudio. ....	48
3.3. RECOPIACION INFORMACION PARA EL MODELO. ....	49
3.3.1. Cobertura vegetal, uso y tipo de suelo. ....	50
3.3.2. Información hidrometeorológica. ....	51
3.3.2.1. Información meteorológica.....	51
3.3.2.2. Información hidrométrica. ....	53
3.3.3. Información Demográfica y cédulas de cultivo.....	54
3.4. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN. ....	56
3.4.1. Análisis de la información meteorológica.....	56
3.4.1.1. Precipitación. ....	56
3.4.1.2. Temperatura. ....	58

3.4.1.3. Velocidad del Viento, Humedad relativa, Fracción de nubosidad y Evapotranspiración de referencia. ....	60
3.4.2. Construcción de la cobertura de Uso de Suelo.....	60
3.4.3. Esquemmatización y construcción del Modelo WEAP.....	63
3.4.3.1. Factor Altitudinal.....	63
3.4.3.2. Factor de influencia del área de incendio.....	64
3.4.3.3. Factor de la actividad agrícola y asentamientos humanos.....	65
3.4.3.4. Factor del Riesgo Hídrico.....	66
3.4.4. Identificación de parámetros de Modelación y programación en WEAP.....	68
3.4.4.1. Supuestos clave.....	68
3.4.4.2. Sitios de Demanda.....	76
3.4.4.3. Recursos y suministros.....	90
3.4.5. Modelo WEAP La Victoria.....	92
3.4.5.1. Cuentas corrientes y reference.....	92
3.4.5.2. Escenario de Incendios.....	93
3.4.5.3. Calibración del Modelo.....	93
3.4.5.4. Validación del Modelo.....	94
CAPÍTULO IV: RESULTADOS OBTENIDOS .....	97
4. RESULTADOS.....	97
4.1. DEMANDA DE AGUA POBLACIONAL Y PARA RIEGO.....	97
4.2. HUMEDAD DEL SUELO.....	98
4.3. HIDROGRAMA DE LA CUENCA.....	99
4.4. CALIBRACIÓN MULTITEMPORAL DEL INCENDIO.....	103
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL INCENDIO SOBRE LA ESCORRENTÍA ...	105
5. CAUDAL.....	105
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	110
6.1. CONCLUSIONES.....	110
6.2. RECOMENDACIONES.....	111
BIBLIOGRAFÍA .....	112
WEBGRAFÍA.....	113
ANEXOS .....	115
ANEXO 1. POLÍGONOS DE THIESSEN DE LA CUENCA VICTORIA.....	116
ANEXO 2. RECOPIACIÓN DE DATOS: SE PROCEDIÓ A BUSCAR LA INFORMACIÓN REFERENTE AL INCENDIO TANTO LA FECHA, COMO ASÍ TAMBIÉN EL ÁREA AFECTADA POR EL INCENDIO EN LA CUENCA EN ESTUDIO.....	117
ANEXO 3. CLASIFICACIÓN NDVI.....	118
ANEXO 4. ANÁLISIS ESPACIAL: SE CLASIFICARON LAS IMÁGENES SATELITALES Y SE ANALIZARON LAS SERIES TEMPORALES DE IMÁGENES PARA OBSERVAR CÓMO EVOLUCIONÓ LA VEGETACIÓN LUEGO DEL INCENDIO CON EL TIEMPO.....	119
ANEXO 5. COBERTURA VEGETAL.....	122
ANEXO 6. DATOS DEL RASTER NETCDF CUENCA LA VICTORIA .....	123
ANEXO 7. GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SUELOS (PROMETA, 2002) .....	123

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Normativa Legal y su aplicación en la zonificación de la Reserva Biológica de Sama.	7
Tabla 2.2. Definición de términos del balde superior.	22
Tabla 2.3. Definición de parámetros del balde superior y descripción WEAP.	23
Tabla 2.4. Definición de términos.	24
Tabla 2.5. Definición de variables del balde inferior.	24
Tabla 2.6. Sensibilidad del modelo.	25
Tabla 2.7. Valores de Kc por unidad de cobertura vegetal y uso de suelo.	26
Tabla 2.8. Capacidad de retención de humedad (CRH).	28
Tabla 2.9. Profundidad máxima de raíces.	29
Tabla 2.10. Profundidad máxima de raíces.	29
Tabla 2.11. Valores de Ks para diferentes clases texturales.	30
Tabla 2.12. Valores de RRF para diferentes lugares (adm).	31
Tabla 2.13. Índice de área foliar (LAI) para distintos tipos de cobertura (adm).	31
Tabla 2.14. Estimaciones de f para diferentes clases de cobertura vegetal (adm).	32
Tabla 2.15. Parámetros de uso de cobertura de suelos balde superior.	33
Tabla 2.16. Parámetros de uso de cobertura de suelos balde inferior.	34
Tabla 2.17. Parámetros del modelo de humedad en el suelo.	35
Tabla 2.18. Parámetros del modelo de humedad en el suelo.	36
Tabla 2.19. Parámetros del modelo de humedad en el suelo.	37
Tabla 2.20. Valores referenciales del criterio de Nash – Sutcliffe.	42

Tabla 3.1. Periodo de estudio. ....	48
Tabla 3.2. Resumen de Datos Requeridos.....	49
Tabla 3.3. Información meteorológica.....	52
Tabla 3.4. Aforos Victoria.....	53
Tabla 3.5. Información demográfica.....	54
Tabla 3.6. Cultivos La Victoria .....	55
Tabla 3.7. Cultivos Rincón de La Victoria.....	55
Tabla 3.8. Cultivos Cadillac.....	56
Tabla 3.9. Comparación datos meteorológicos (Precipitación).....	57
Tabla 3.10. Comparación datos meteorológicos (Temperatura) .....	59
Tabla 3.11. Factores de modelación (Cuentas corrientes).....	69
Tabla 3.12. Factores de modelación (Reference / Incendios).....	69
Tabla 3.13. Área por tipo de cobertura en cada rango NDVI (Julio – 2002) .....	70
Tabla 3.14. Porcentaje de área por tipo de cobertura en cada rango NDVI (Julio – 2002). ....	71
Tabla 3.15. Cambio de NDVI para los años de estudio. ....	71
Tabla 3.16. Cambio porcentual de área año 2016.....	72
Tabla 3.17. Cambio porcentual de área año 2017.....	72
Tabla 3.18. Cambio porcentual de área año 2018.....	73
Tabla 3.19. Cambio porcentual de área año 2019.....	73
Tabla 3.20. Cambio porcentual de área año 2020.....	74
Tabla 3.21. Cambio porcentual de área año 2021.....	74
Tabla 3.22. Cambio porcentual de área año 2015 (Cuentas corrientes).....	75
Tabla 3.23. Coberturas de Unidades Hidrológicas (Cuentas corrientes) .....	76
Tabla 3.24. Datos de precipitación extraídos de las grillas meteorológicas.....	77



Tabla 3.25. Datos de temperatura extraídos de las grillas meteorológicas .....	80
Tabla 3.26. Datos de evapotranspiración .....	83
Tabla 3.27. Datos Humedad relativa, Fracción de nubosidad y Vel. viento .....	85
Tabla 3.28. Datos Cedula de Cultivo .....	87
Tabla 3.29. Datos Coeficientes de Cultivo.....	88
Tabla 3.30. Datos Caudal de la toma .....	90
Tabla 3.31. Mediciones hidrométricas.....	92
Tabla 3.32. Calibración del modelo.....	93
Tabla 3.33. Estadísticos de calibración del modelo.....	94
Tabla 3.34. Validación del modelo.....	95
Tabla 3.35. Estadísticos de validación del modelo.....	96
Tabla 4.1. Demanda agua poblacional y para riego.....	97
Tabla 4.2. Hidrograma Reference.....	99
Tabla 4.3. Hidrograma Incendio.....	100
Tabla 4.4. Relación Incendio/Reference .....	103
Tabla 4.5. Estadísticos de calibración multitemporal del incendio .....	104
Tabla 5.1. Volumen punto de control obra toma Cosaalt.....	106
Tabla 5.2. Caudal y Volumen promedio Ago 2017- Sep 2017 .....	107
Tabla 5.3. Volumen en la afluencia río Guadalquivir.....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ciclo hidrológico.....	13
Figura 2.2. Proceso de Evapotranspiración. ....	14
Figura 2.3. Capacidad de infiltración en diferentes suelos.....	15
Figura 2.4. Método humedad de suelo. ....	20
Figura 2.5. Estaciones de aforo para calibración (Zona Media).....	41
Figura 3.1. Ubicación de la cuenca La Victoria .....	47
Figura 3.2. Cobertura vegetal cuenca La Victoria .....	50
Figura 3.3. Mapa Fisiográfico cuenca La Victoria .....	51
Figura 3.4. Puntos de aforo.....	54
Figura 3.5. Grupo Hidrológico Victoria.....	61
Figura 3.6. Combinación Vegetación y Grupo Hidrológico .....	62
Figura 3.7. Victoria Ráster NETCDF .....	63
Figura 3.8. Niveles Altitudinales .....	64
Figura 3.9. Área de Incendio .....	65
Figura 3.10. Actividad Antrópica .....	66
Figura 3.11. Riesgo Hídrico Victoria.....	67
Figura 3.12. Delimitación Unidades Hidrológicas .....	68
Figura 3.13. Precipitación en la Cuenca del río La Victoria .....	80
Figura 3.14. Temperatura en la Cuenca .....	83
Figura 3.15. Evapotranspiración en la Cuenca .....	85
Figura 3.16. Humedad relativa .....	86
Figura 3.17. Fracción de nubosidad.....	86
Figura 3.18. Velocidad de viento.....	87
Figura 3.19. Coeficiente de cultivo de cedulas de cultivo.....	89
Figura 3.20. Crecimiento poblacional.....	90

Figura 3.21. Caudal en el canal de COSAALT R.L. ....	91
Figura 3.22. Caudal medido .....	92
Figura 3.23. Calibración del modelo.....	94
Figura 3.24. Validación del modelo.....	95
Figura 4.1. Demanda agua poblacional y para riego.....	98
Figura 4.2. Humedad del Suelo .....	99
Figura 4.3. Caudal de entrada y salida por clase de suelo, escenario reference .....	100
Figura 4.4. Caudal de entrada y salida por clase de suelo, escenario incendios.....	101
Figura 4.5. Oferta de agua .....	102
Figura 4.6. Demanda de agua .....	102
Figura 4.7. Calibración multitemporal del incendio .....	104
Figura 5.1. Caudal de cabeceras de cuencas antes del incendio .....	105
Figura 5.2. Impacto del incendio en el caudal .....	106
Figura 5.3. Caudal de cabeceras de cuencas después del incendio (reference).....	108
Figura 5.4. Caudal de cabeceras de cuencas después del incendio (Incendio).....	109