

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



**“APLICABILIDAD DEL MODELO HIDROLÓGICO AGREGADO GR2M PARA LA
GENERACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LA CUENCA DEL RÍO
TOLOMOSA”**

Por:

MARCELO FABIAN RAMIREZ ZAMORA

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 - II – 2023
TARIJA-BOLIVIA

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

**“APLICABILIDAD DEL MODELO HIDROLÓGICO AGREGADO GR2M PARA LA
GENERACIÓN DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LA CUENCA DEL RÍO
TOLOMOSA”**

Por:

MARCELO FABIAN RAMIREZ ZAMORA

SEMESTRE - II – 2023
TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

El resultado de este trabajo está dedicado mi familia en especial a mis padres y hermanos, también a mis amigos que me dieron su apoyo incondicional a lo largo de estos años de estudio para poder cumplir mis metas en la vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAP. I: GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3.1 Formulación del problema	4
1.3.2 Sistematización del problema	5
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4.1 Justificación teórica	6
1.4.2 Justificación práctica.....	6
1.4.3 Justificación metodológica.....	6
1.5 HIPÓTESIS	6
1.6 OBJETIVOS.....	6
1.6.1 Objetivo general.....	6
1.6.2 Objetivos específicos	6
CAP. II: MARCO DE REFERENCIA	8
2.1 MARCO TEÓRICO.....	8
2.1.1 Ciclo hidrológico	8
2.1.2 Sistema hidrológico	9
2.1.3 Balance hídrico	10
2.1.4 Modelo hidrológico.....	10
2.1.5 Modelo hidrológico GR2M.....	11
2.1.6 Análisis exploratorio de datos.....	14
2.1.7 Regionalización.....	15
2.1.8 Análisis de consistencia	17

2.1.9	Completación de datos	22
2.1.10	Evapotranspiración	25
2.1.11	Interpolación espacial	26
2.1.12	Calibración	28
2.1.13	Validación	29
2.1.14	Medidas de ajuste	30
2.2	MARCO CONCEPTUAL	30
	Cuenca hidrológica	30
	Modelo hidrológico	30
	Precipitación	31
	Escorrentía superficial	31
	Infiltración	31
	Percolación	32
	Temperatura	32
	Radiación solar	32
	Evaporación	33
	Transpiración	33
	Calibración	33
	Validación	34
	Curva de duración de caudales	34
2.3	MARCO ESPACIAL	34
2.4	MARCO TEMPORAL	34
CAP. III: MATERIALES Y MÉTODOS		35
CAP. IV: MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO TOLOMOSA.		38
4.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	38

4.2	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA	40
4.2.1	Periodo considerado para el estudio	42
4.2.2	Información meteorológica.....	42
4.3	ANÁLISIS EXPLORATORIO DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA	45
4.3.1	Precipitaciones	45
4.3.2	Temperatura	52
4.4	IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES HOMOGÉNEAS.....	59
4.4.1	Método de Ward	59
4.4.2	Vector Regional	60
4.5	ANÁLISIS DE CONSISTENCIA	66
4.6	COMPLETACIÓN DE DATOS FALTANTES	69
4.7	EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	74
4.8	INTERPOLACIÓN CLIMÁTICA.....	75
4.9	GENERACIÓN DE CAUDALES MENSUALES	76
CAP. V: APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO GR2M		88
5.1	CALIBRACIÓN.....	88
5.2	VALIDACIÓN.....	91
CAP. VI: EVALUACIÓN DEL MODELO.....		94
6.1	INCERTIDUMBRE DE LAS VARIABLES DE ENTRADA.....	95
6.2	COMPARACIÓN CON OTROS ESTUDIOS	96
CAP. VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		98
7.1	CONCLUSIONES	98
7.2	RECOMENDACIONES	99
8.	BIBLIOGRAFÍA	100
9	ANEXOS.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación del ciclo hidrológico	8
Figura 2 Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico	9
Figura 3 Esquema de un sistema hidrológico, mostrando entradas y salidas	10
Figura 4 Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo con la forma aleatoriedad, variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos	11
Figura 5 Estructura del Modelo hidrológico GR2M.....	12
Figura 6 Representación gráfica del diagrama de cajas.....	15
Figura 7 Serie con componente transitoria en la forma de salto.....	18
Figura 8 Serie con componente transitoria en la forma de tendencia.....	18
Figura 9 Representación gráfica del método Cutoff N° 1.	24
Figura 10 Representación gráfica del método Cutoff N° 2	24
Figura 11 Repartición de la evotranspiración en evaporación y transpiración durante el periodo de crecimiento de un cultivo anual.	25
Figura 12 Inverso distancia.....	28
Figura 13 Estructura de la metodología.....	37
Figura 14 Mapa de ubicación.....	39
Figura 15 Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas.....	41
Figura 16 Calendario de datos de precipitación.....	42
Figura 17 Calendario de datos de temperaturas.....	44
Figura 18 Porcentaje de datos incompletos de precipitación.....	46
Figura 19 Hidrogramas de precipitación mensual	47
Figura 20 Diagramas de caja de la precipitación mensual.....	49
Figura 21 Porcentaje de datos incompletos de temperaturas	53
Figura 22 Hidrogramas y diagramas de caja de temperatura máxima mensuales.	53
Figura 23 Hidrogramas y diagramas de caja de temperaturas mínimas mensuales.....	57
Figura 24 Dendrograma de Ward	60
Figura 25 Índices anuales del vector y las estaciones del grupo 1	61
Figura 26 Índices anuales del vector y las estaciones del grupo 2.	62
Figura 27 Índices anuales del vector y las estaciones del grupo 3	63
Figura 28 Índices anuales del vector y las estaciones del grupo 3	64

Figura 29 Mapa de estaciones homogéneas.....	65
Figura 30 Correlación de precipitación entre las estaciones de cada grupo.	69
Figura 31 Hidrogramas de precipitaciones mensuales completadas grupo 1.	70
Figura 32 Hidrogramas de precipitaciones mensuales completadas grupo 2.	71
Figura 33 Hidrogramas de precipitaciones mensuales completadas grupo 3.	71
Figura 34 Hidrogramas de precipitaciones mensuales completadas grupo 4.	72
Figura 35 Correlación de temperaturas entre estaciones	73
Figura 36 Hidrogramas de temperaturas máximas completadas.	73
Figura 37 Hidrograma de temperaturas mínimas completadas.	74
Figura 38 Precipitación media sobre la cuenca del río Tolomosa	75
Figura 39 ETo media sobre la cuenca del río Tolomosa	76
Figura 40 Representación gráfica de una cuenca regulada.	77
Figura 41 Elementos para el dimensionado del volumen a embalsar.....	78
Figura 42 Volumen promedio utilizado por la planta hidroeléctrica.....	81
Figura 43 Volumen de riego año 2022.	82
Figura 44 Tasa de evaporación método Penman Vs Observada.....	83
Figura 45 Volumen promedio de bombeo.	85
Figura 46 Volumen evacuado por el vertedero.....	86
Figura 47 Caudales medios mensuales.	86
Figura 48 Mapa de ubicación de la estación hidrométrica.	87
Figura 49 Caudales observados y simulados del periodo de calibración	89
Figura 50 Dispersión entre caudales observados y simulados “calibración”	90
Figura 51 Curva de duración de caudales “calibración”.....	91
Figura 52 Caudales observados y simulados del periodo de validación.....	91
Figura 53 Dispersión entre caudales observados y simulados “validación”	92
Figura 54 Curva de duración de caudales “validación”.....	93
Figura 55. Caudales medios mensuales	94
Figura 56 Caudal medio mensual multianual.	95
Figura 57 Caudales medios mensuales multianuales simulados	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores de Eficiencia de Nash-Sutcliffe.....	30
Tabla 2 Estaciones meteorológicas preseleccionadas.....	40
Tabla 3 Extensión de los registros de precipitación.....	43
Tabla 4 Extensión de los registros de temperatura.	44
Tabla 5 Porcentaje de datos faltantes de precipitación mensual.....	45
Tabla 6 Porcentaje de datos faltantes de temperaturas	52
Tabla 7 Parámetros de estimación del vector regional grupo 1.	61
Tabla 8 Índices anuales del vector y las estaciones del grupo 2.....	62
Tabla 9 Índices anuales del vector y las estaciones del grupo 3.....	62
Tabla 10 Índices anuales del vector y las estaciones del grupo 4.....	63
Tabla 11 Resumen de análisis de saltos.....	67
Tabla 12 Resumen de análisis de tendencia.....	68
Tabla 13. Tasa de evaporación mensual método Penman y observada.	83
Tabla 14 Valores de infiltración mensual.	84
Tabla 15 Rango de valores de los parámetros X1 y X2.....	88
Tabla 16 Valores de parámetros calibrados.	89
Tabla 17 Estadísticos para la calibración.....	90
Tabla 18 Estadísticos para la validación.	92
Tabla 19 Caudales mensuales multianuales.....	94
Tabla 20 Caudales simulados por modelos hidrológicos.....	96

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Registro de información de salidas de volúmenes del embalse San Jacinto.

Anexo 2 Caudales medios mensuales observados.

Anexo 3 Datos de entrada al modelo GR2M

Anexo 4 Caudales simulados.

Anexo 5 Script de RStudio para la modelación hidrológica con GR2M

Anexo 6 Información registrada.