

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



**“MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA EL PRONÓSTICO DE
SEQUÍAS EN LA ZONA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO
GUADALQUIVIR BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO”**

Por:

ALVARO LLANOS PUITA

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 – 2022

TARIJA-BOLIVIA

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

**“MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA EL PRONÓSTICO DE
SEQUÍAS EN LA ZONA DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO
GUADALQUIVIR BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO”**

Por:

ALVARO LLANOS PUITA

SEMESTRE - II – 2022

TARIJA-BOLIVIA

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”.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

	Página
1.1 Antecedentes	1
1.2 Alcance.....	2
1.2.1 Delimitación temporal.....	3
1.2.2 Delimitación espacial	3
1.3 Planteamiento del problema.....	4
1.4 Justificación.....	4
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo general	5
1.5.2 Objetivos específicos	5
1.6 Hipótesis.....	5

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

	Página
2.1 Estado del arte	6
2.2 Marco conceptual	7
2.2.1 Cambio climático	7
2.2.2 Impacto del cambio climático, riesgos e impactos.....	7
2.2.3 Cambios proyectados en el sistema climático.....	7
2.2.4 Efectos del cambio climático en el ciclo del agua	8
2.2.5 Cambio climático en Bolivia.....	8
2.2.6 Sequías	8
2.2.7 Tipos de sequías	10
2.2.8 Descripción de índices de sequía	12
2.2.9 Duración de la sequía	15
2.2.10 Intensidad de la sequía	15

2.2.11	Severidad de la sequía.....	15
2.2.12	Modelo de circulación global (GCM).....	16
2.2.13	Método de reducción de escala	17
2.2.14	Modelo matemático.....	18
2.2.15	Modelación hidrológica	18
2.2.16	Modelamiento hidrológico	19
2.3	Modelo hidrológico Hydro-BID	20
2.3.1	Análisis de requerimientos de Hydro-BID.....	20
2.3.2	Base de datos de hidrología analítica.....	22
2.3.3	Base de datos SQLITE	22
2.3.4	Modelo de hidrológico lluvia-escorrentía GWLF.....	22
2.3.5	Cálculos del modelo de GWLF.....	24
2.3.5.1	Parametrización y datos	29
2.3.6	Calibración del modelo	32
2.3.7	Proyecciones de cambio climático	33

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA Y DESARROLLO

	Página	
3.1	Obtención de datos y desarrollo del modelo base.....	37
3.1.1	Ubicación geográfica de la cuenca.....	37
3.1.2	Ámbito geográfico	39
3.1.3	Topografía.....	39
3.1.4	Geología	39
3.1.5	Parámetros morfométricos y características de la cuenca.....	40
3.1.6	Selección de escalas y período de estudio.....	41
3.1.7	Escala temporal	41
3.1.8	Escala espacial	42
3.1.9	Periodo histórico de estudio.....	43
3.1.10	Búsqueda de información.....	43

3.1.11	Información meteorológica	43
3.1.12	Información hidrométrica.....	54
3.1.12.1	Estación de obras.....	54
3.2	Llenado de datos y consistencia.....	56
3.2.1	Análisis exploratorio de datos.....	56
3.2.2	Precipitaciones	56
3.2.3	Temperaturas.....	58
3.2.4	Estadísticas.....	61
3.2.5	Análisis gráfico	63
3.2.6	Relleno de series faltantes.....	77
3.2.6.1	Razón normal (NR).....	77
3.2.7	Resultado del relleno de datos faltantes	79
3.3	Calibración y validación del modelo Hydro-BID	82
3.3.1	Parámetros para realizar la calibración	83
3.4	Análisis de cambio climático	86
3.4.1	Selección del modelo de circulación global.....	87
3.4.2	Reducción de escala basándose en información del WorldClim v2.1	88
3.4.2.1	Obtención de factores de incremento y disminución mensual de precipitación/temperatura.....	89
3.4.3	Modelación de caudales futuros a partir de escenarios de cambio climático .	91
3.5	Realización de indicadores de sequía hidrológica	93

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

	Página	
4.1	Fase 1	96
4.1.1	Llenado de datos y consistencia de datos.....	96
4.1.1.1	Análisis de resultados de la estimación de datos faltantes de precipitación	96
4.1.1.2	Análisis de resultados de la estimación de datos faltantes de temperatura máxima y mínima.....	98

4.1.2	Calibración y validación del modelo Hydro-BID	101
4.2	Fase 2	104
4.2.1	Análisis de cambio climático	104
4.2.1.1	Selección del modelo de circulación global	104
4.2.1.2	Reducción de escala y obtención de factores de incremento y disminución mensual de precipitación/temperatura.....	105
4.2.1.3	Modelación de caudales futuros a partir de escenarios de cambio climático	108
4.3	Fase 3	110
4.3.1	Realización de indicadores de sequía hidrológica	110
4.4	Análisis de estrategias que compensen los efectos del cambio climático.....	112
4.4.1	Disponibilidad del agua para riego y desarrollo integral	113
4.4.1.1	Gestión proyectos de aprovechamiento hídrico	114
4.4.1.2	Monitoreo del régimen hidro climático.....	116
4.4.2	Gestión de la calidad hídrica y resiliencia de los sistemas de vida.....	117
4.4.2.1	Mejoramiento de la calidad del agua	118
4.4.2.2	Resiliencia de los sistemas de vida de valles y montañas al cambio climático.....	119

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Página	
5.1	Conclusiones	122
5.2	Recomendaciones.....	123

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Antecedentes de investigación.....	6
Tabla 2: Clases, valores y asignación cromática del PDSI, SPI y NDVI	14
Tabla 3: Elementos de la base de datos analítica (AHD) de Hydro-BID.....	22
Tabla 4: Principales parámetros del GWLF que están relacionados con la generación de flujos.....	29
Tabla 5: Grupos hidrológicos del suelo.	30
Tabla 6: Consulta del número de curva.....	31
Tabla 7: Parámetros de calibración de Hydro-BID.....	32
Tabla 8: Métricas de desempeño Hydro-BID	33
Tabla 9: Relieve topográfico en la cuenca alta del río Guadalquivir.	39
Tabla 10: Parámetros de forma cuenca alta río Guadalquivir.....	40
Tabla 11: Estaciones meteorológicas activas identificadas	45
Tabla 12: Estaciones meteorológicas inactivas identificadas	47
Tabla 13: Período de registro de precipitación diaria - estaciones abiertas	48
Tabla 14: Período de registro de temperatura máxima diaria - estaciones abiertas	49
Tabla 15: Período de registro de temperatura mínima diaria - estaciones abiertas.....	50
Tabla 16: Período de registro de precipitación diaria - estaciones cerradas	51
Tabla 17: Período de registro de temperatura máxima diaria - estaciones cerradas ...	52
Tabla 18: Período de registro de temperatura mínima diaria - estaciones cerradas....	53
Tabla 19: Estaciones hidrométricas de la cuenca alta del río Guadalquivir	54
Tabla 20: Datos faltantes de precipitación de las estaciones pluviométricas.....	57
Tabla 21: Datos faltantes de temperatura de las estaciones meteorológicas.....	59
Tabla 22: Estadísticas de los valores de precipitación sin tratamiento	62
Tabla 23: Estaciones rellenadas	77
Tabla 24: Valores óptimos de las métricas.	83
Tabla 25: Parámetros de calibración para la cuenca alta del río Guadalquivir.....	84
Tabla 26: Métricas de desempeño calibración	84
Tabla 27: Métricas de desempeño validación	85
Tabla 28: Desviaciones mensuales	91

Tabla 29: Porcentaje de variación de caudales futuros	92
Tabla 30: Parámetros de calibración para la cuenca alta del río Guadalquivir	101
Tabla 31: Métricas de desempeño calibración	102
Tabla 32: Métricas de desempeño validación	103
Tabla 33: Desviaciones mensuales	108
Tabla 34: Porcentaje de variación de caudales futuros.	108
Tabla 36: Valores del índice normalizado de precipitación.....	111
Tabla 36: Comparación de SQI entre SSP - 126 y SSP - 845.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Cuenca alta del río Guadalquivir	3
Figura 2: Causas y consecuencias de las distintas clases de sequías	12
Figura 3: Representación de la ocurrencia de sequías con indicación de su duración e intensidad.	15
Figura 4: Esquema conceptual de un GCM	16
Figura 5: El concepto de reducción de escala espacial.	17
Figura 6: Esquema conceptual de los procesos hidrológicos.....	19
Figura 7: Diagrama de flujo del funcionamiento de Hydro-BID.....	21
Figura 8: Representación esquemática del modelo GWLF.....	23
Figura 9: Los números de curva se seleccionan como funciones de la humedad	26
Figura 10: Movimiento de los flujos a través de la red de la AHD	29
Figura 11: Representación esquemática de la estimación del número de curva.	30
Figura 12: Desviaciones mensuales	35
Figura 13: Estructura metodológica para la modelación hidrológica.	36
Figura 14: Cuenca alta del río Guadalquivir perteneciente al COMID (31332190)...	37
Figura 15: Mapa de la ubicación de la cuenca de estudio.....	38
Figura 16: Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la cuenca alta del río Guadalquivir.....	41
Figura 17: Ubicación geográfica de las estaciones activas meteorológicas.....	44
Figura 18: Ubicación geográfica de las estaciones inactivas meteorológicas.....	46
Figura 19: Registro histórico de caudales aforados de la estación Obrajes.	54
Figura 20: Estaciones hidrométricas en la zona de la cuenca alta del río Guadalquivir.....	55
Figura 21: Valores perdidos de datos faltantes de precipitación.....	57
Figura 22: Series de precipitación diaria de las estaciones.	58
Figura 23: Valores perdidos de datos faltantes de temperatura.	59
Figura 24: Series de temperatura máxima diaria de las estaciones.....	60
Figura 25: Series de temperatura mínima diaria de las estaciones.....	61
Figura 26: Script de código R del paquete HydroTSM.....	63

Figura 27: Series temporales estación Campanario de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.....	64
Figura 28: Series temporales estación Coimata de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	65
Figura 29: Series temporales estación El Tejar Tarija de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.....	66
Figura 30: Series temporales estación San Andrés de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	68
Figura 31: Series temporales estación San Jacinto Sud de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.....	69
Figura 32: Series temporales estación Sella Quebrada de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.....	70
Figura 33: Series temporales estación Tarija Aeropuerto de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.....	71
Figura 34: Series temporales estación Tomayapo Pueblo de Precipitación.....	72
Figura 35: Series temporales estación Trancas de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	73
Figura 36: Series temporales estación Tucumillas de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.	74
Figura 37: Series temporales estación Yesera Norte de a) Precipitación, b) Temperatura máxima y c) Temperatura mínima.....	76
Figura 38: Matriz de correlaciones - Datos de precipitación sin la completación.	78
Figura 39: Series de precipitación diaria de datos completados.	79
Figura 40: Matriz de correlaciones - Datos de precipitación diaria.	79
Figura 41: Series de temperatura máxima diaria de datos completados.	80
Figura 42: Matriz de correlaciones – Temperatura máxima.	80
Figura 43: Series de temperatura mínima diaria de datos completados.....	81
Figura 44: Matriz de correlaciones – Temperatura mínima.....	81
Figura 45: Estación hidrométrica de Obrajes.....	82
Figura 46: Curvas de duración antes y después de calibrar la estación de Obrajes	84

Figura 47: Hidrograma de calibración de caudales modelados vs observados [1980 - 2010].....	85
Figura 48: Curvas de duración-validación de la estación de Obrajes.	85
Figura 49: Hidrograma de validación de caudales modelados vs observados [2011 - 2014].....	86
Figura 50: Representación de los escenarios a futuro de las concentraciones de CO ₂	87
Figura 51: Escenarios climáticos para la cuenca alta del río Guadalquivir [2021-2040].....	88
Figura 52: Plataforma para descargar los modelos de circulación global (GCM).	89
Figura 53: Precipitación media mensual de los escenarios climáticos y de los datos observados.....	90
Figura 54: Temperatura media mensual de los escenarios climáticos y de los datos observados.....	90
Figura 55: Caudales proyectados.	92
Figura 56: Curvas de duración de caudales proyectados.	92
Figura 57: Índices normalizados de caudales (SQL) en la escala temporal anual (12meses).	95
Figura 58: Script de código R del paquete SPEI.....	95
Figura 59: Series de precipitación diaria de datos completados.	96
Figura 60: Curva de doble masa de precipitación de la estación Campanario.....	97
Figura 61: Matriz de correlaciones - Datos de precipitación.	98
Figura 62: Series de temperatura máxima diaria de datos completados.	99
Figura 63: Matriz de correlación – Datos de temperatura máxima.....	99
Figura 64: Series de temperatura mínima diaria de datos completados.....	100
Figura 65: Matriz de correlación – Datos de temperatura mínima	100
Figura 66: Curvas de duración antes y después de calibrar la estación de Obrajes. .	102
Figura 67: Hidrograma de calibración de caudales modelados vs observados [1980 - 2010].....	102
Figura 68: Curvas de duración-validación de la estación de Obrajes.	103

Figura 69: Hidrograma de validación de caudales modelados vs observados [2011 - 2014].....	104
Figura 70: Escenarios Climáticos para la cuenca alta del río Guadalquivir [2021-2040].....	105
Figura 71: Plataforma para descargar los modelos de circulación global.....	106
Figura 72: Precipitación media mensual de los escenarios climáticos y de los datos observados.....	106
Figura 73: Temperatura media mensual de los escenarios climáticos y de los datos observados.....	107
Figura 74: Caudales proyectados.	109
Figura 75: Curvas de duración de caudales proyectados.	109
Figura 76: Índices normalizados de Caudales en la escala temporal anual (12 meses).	110
Figura 77: Líneas de acción y acciones específicas de la estrategia “Disponibilidad de agua para riego y desarrollo integral”.	112
Figura 78: Líneas de acción y acciones específicas de la estrategia “Gestión de la calidad hídrica y resiliencia de los sistemas de vida”.	118

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
ANEXO A: Ubicación geográfica de las estaciones empleadas para el análisis en el período 1980-2021	132
ANEXO B: Series de precipitación diaria de las estaciones.....	133
ANEXO C: Series de temperatura máxima diaria de las estaciones.....	134
ANEXO D: Series de temperatura mínima diaria de las estaciones	135
ANEXO E: Series de precipitación diaria (en color azul) con la correspondiente completación de datos (color rojo)	136
ANEXO F: Matriz de correlaciones - Precipitación diaria	136
ANEXO G: Series de temperatura máxima diaria (en color azul) con la correspondiente completación de datos (color rojo).....	137
ANEXO H: Matriz de correlaciones – Temperatura máxima.....	137
ANEXO I: Series de temperatura mínima diaria (en color azul) con la correspondiente completación de datos (color rojo).....	138
ANEXO J: Matriz de correlaciones – Temperatura mínima.....	138
ANEXO K: Series de temperatura máxima y mínima mensual diaria de datos completados	139
ANEXO L: Curvas de doble masa para precipitación mensual.....	139
ANEXO M: Índices de severidad de la sequía hidrológica SQI escala temporal (1 meses).....	145
ANEXO N: Índices de severidad de la sequía hidrológica SQI escala temporal (3 meses).....	145
ANEXO O: Índices de severidad de la sequía hidrológica SQI escala temporal (6 meses).....	146
ANEXO P: Índices de severidad de la sequía hidrológica SQI escala temporal (12 meses).....	146
ANEXO Q: Mapas de la cuenca alta del río Guadalquivir período 2021-2040 [ssp-126 y ssp-845].....	146