

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



**“VERIFICACIÓN DE LA GRILLA CLIMATOLÓGICA GMET
PARA SU APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO
GUADALQUIVIR” (TARIJA-BOLIVIA, PERIODO 1980-2016)**

Por:

JOSÉ DANIEL TÉLLEZ QUIROZ

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

Semestre-II-2019

TARIJA – BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS

**“VERIFICACIÓN DE LA GRILLA CLIMATOLÓGICA GMET
PARA SU APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO
GUADALQUIVIR” (TARIJA-BOLIVIA, PERIODO 1980-2016)**

Por:

JOSÉ DANIEL TÉLLEZ QUIROZ

Semestre-II-2019
TARIJA – BOLIVIA

El docente y tribunal evaluador del presente trabajo, no se solidarizan con los términos, la forma, los modos y las expresiones empleadas en la elaboración del presente trabajo, siendo las mismas únicamente responsabilidades del autor.

DEDICATORIA

A mis padres, José y Angélica. A mis hermanas, Cintia, Katherine y María Belén. Por ser fuente de inspiración y de apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por el hermoso don de la vida y por el simple hecho de estar aquí.

A mis padres, por el sacrificado esfuerzo realizado en todos los años de estudio siendo ejemplo de amor, fuerza, dedicación y constancia.

A mis hermanos y familiares, por todo el apoyo brindado en todo este tiempo.

A la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho y a la carrera de Ingeniería civil por la oportunidad de realizarme como profesional.

Al Ing. Ivar Colodro Mendivil. Por brindarme su tiempo y ayuda para la elaboración de este trabajo.

A mis amigos, por haber compartido momentos gratos y difíciles, una promesa de amistad nos mantendrá siempre unidos pese a las distancias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. El problema.....	3
1.2.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2.1.1. Formulación del problema.....	4
1.3. Objetivos del Proyecto.....	5
1.3.1. Objetivo general.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Justificaciones del proyecto.....	5
1.4.1. Justificación académica.....	5
1.4.2. Justificación técnica.....	6
1.4.3. Justificación social.....	6
1.4.4. Justificación Institucional.....	6
1.5. Marco teórico.....	7
1.5.1. Marco conceptual.....	7
1.5.2. Marco espacial.....	8
1.5.3. Marco temporal.....	9
1.6. Alcance del proyecto.....	9
1.7. Localización.....	9
1.7.1. Descripción de la Cuenca.....	11
1.7.1.1. Sub Cuenca Canasmoro.....	11

1.7.1.2. Sub Cuenca	
Obrajes.....	12
1.7.1.3. Sub Cuenca Sella Quebrada.....	13
1.7.1.4. Sub Cuenca Vitoria.....	14
1.7.1.5. Sub Cuenca Tarija Ciudad.....	15
1.7.1.6. Sub Cuenca Yesera.....	17
1.7.1.7. Sub Cuenca San Jacinto 1.....	18
1.7.1.8. Sub Cuenca Tolomosa.....	19
1.7.1.9. Sub Cuenca San Jacinto 2.....	21
1.7.1.10. Sub Cuenca San Nicolás.....	22
1.7.1.11. Sub Cuenca Uriondo.....	23
1.7.1.12. Sub Cuenca Uriondo 2.....	24

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	26
2.1. Información Relativa A Los Recursos Hídricos.....	26
2.2. Medición de las Precipitaciones.....	27
2.3. Ubicación de un pluviómetro.....	27
2.4. Errores y exactitud en las mediciones.....	28
2.5. Evaporación y evapotranspiración.....	28
2.5.1. Evaporación.....	28
2.5.2. Transpiración.....	29
2.5.3. Evapotranspiración.....	29
2.6. Red de datos hidrológicos.....	29
2.6.1. Red básica.....	29

2.6.2. Red mínima.....	30
2.7. Lenguaje de programación R.....	30
2.7.1. Características.....	30
2.8. Gridded Meteorological Ensemble Tool (GMET).....	31
2.8.1. Interpolación probabilística.....	33
2.8.2. Interpolación espacial.....	33
2.8.3. Generación del ensamble.....	36

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR.....	40
3.1. Período considerado para el estudio.....	40
3.2. Estaciones seleccionadas para el estudio.....	40
3.3. Información de precipitación y temperatura disponible.....	43
3.3.1. Registros de precipitaciones diarias.....	43
3.3.2. Registro de temperaturas máximas y mínimas.....	45
3.4. Control de datos mediante DECADE.....	46
3.4.1. Control visual de los datos registrados.....	46
3.4.2. Gráficos de puntos de las series temporales.....	47
3.4.3. Histograma temporal (años) de datos faltantes.....	49
3.5. Relleno de datos de precipitación.....	51
3.5.1. Métodos Multivariados.....	52
3.5.1.1. Razón Normal.....	52
3.5.1.2. Criterio de la correlacion línea.....	52

3.5.1.3. Criterio de la correlación lineal ponderada (CLP).....	52
3.5.2. Correlacion entre estaciones cercanas para la precipitación.....	53
3.6. Relleno de datos de temperaturas.....	62
3.6.1. Correlacion entre estaciones cercanas para la temperatura máxima diaria y mínima.....	63

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE LAS GRILLAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA.....	68
4.1. Gridded Meteorological Ensemble Tool (GMET).....	68
4.2. Metodología para la generación de las grillas.....	68
4.2.1. Pre-Procesamiento.....	69
4.2.1.1. Datos de las estaciones meteorológicas.....	69
4.2.1.2. Formateo de los datos de las estaciones.....	72
4.2.1.3. Unión de los archivos de precipitación diaria, temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria.....	79
4.2.1.4. Formato GMET.....	82
4.2.1.4.1. Formato GMET para la precipitación.....	82
4.2.1.4.2. Formato GMET para temperatura máxima diaria y mínima diaria.....	85
4.2.1.5. Creación de un archivo netCDF en base a DEM de la cuenca.....	87
4.2.2. Ejecución.....	90
4.2.2.1. Coordinates files.....	90
4.2.2.2. Generación de la grilla.....	91
4.2.2.2.1. Config_regresssion.....	95

4.2.2.3. Generación de los ensambles de precipitación diaria y temperatura media diaria.	98
4.2.2.3.1. Namelist.params.....	98
4.2.3. Post-procesamiento.....	101
4.2.3.1. Calculo del ensamble promedio diario a partir de todos los ensambles generados	101
4.2.3.2. Calculo de la precipitación acumulada mensual y anual.....	104
4.2.3.3. Validación de la grilla.....	106
4.2.3.3.1. Coeficiente de correlación (CC).....	106
4.2.3.3.2. Error medio del sesgo (MBE).....	107
4.2.3.3.3. Error de la raíz cuadrada (RMSE)	107
4.2.3.3.4. Coeficiente de variación del RMSE (CV-RMSE).....	107
4.2.3.3.5. Error medio absoluto (MAE).....	108

CAPÍTULO V

5. VERIFICACIÓN DE LAS GRILLA DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DE LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR.....	109
5.1. Evaluación diaria de los datos generados por GMET.....	109
5.1.1. Medidas estadísticas.....	109
5.1.1.1. Medidas estadísticas generadas por GMER para la cuenca del Río Guadalquivir y las medidas estadísticas generadas en el Balance Hídrico Superficial de Bolivia.....	109
5.1.1.2. Visualización de los datos.....	111
5.2. Análisis de los datos generados por GMET y los datos medidos en las diferentes zonas de relleno de la precipitación a nivel anual.....	113
5.2.1. Zona 1.....	113
5.2.2. Zona 2.....	118

5.2.3. Zona 3.....	123
5.2.4. Zona 4.....	128
5.2.5. Zona 5.....	133
5.2.6. Zona 6.....	137
5.2.7. Zona 7.....	142
5.3. Comparación de los datos de temperatura media a nivel diario.....	147
5.3.1. Análisis de la estación Tarija Aeropuerto y el Tejar Aeropuerto.....	148
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	150
Conclusiones.....	150
Recomendaciones.....	152
BIBLIOGRAFÍA.....	154

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura: 1.1 Cuenca del Rio Guadalquivir.....	10
Figura: 1.2 Sub-Cuenca de Canasmoro.....	11
Figura: 1.3 Sub-Cuenca de Obrajes.....	12
Figura: 1.4 Sub-Cuenca de Sella Quebradas.....	13
Figura: 1.5 Sub-Cuenca de Vitoria.....	14
Figura: 1.6 Sub-Cuenca de Tarija Ciudad.....	15
Figura: 1.7 Sub-Cuenca de Yesera.....	17
Figura: 1.8 Sub-Cuenca de San Jacinto 1.....	18
Figura: 1.9 Sub-Cuenca de Tolomosa.....	19
Figura: 1.10 Sub-Cuenca de San Jacinto 2.....	21
Figura: 1.11 Sub-Cuenca de San Nicolás.....	22
Figura: 1.12 Sub-Cuenca de Uriondo.....	23
Figura: 1.13 Sub-Cuenca de Uriondo 2.....	24
Figura: 1.14 Ciclo Hidrológico.....	26

CAPÍTULO II

Figura: 2.1 Clico Hidrológico.....	26
Figura: 2.2 Colocación del pluviómetro.....	27
Figura: 2.3 Flujo de trabajo.....	32
Figura: 2.4 Ejemplo de campos aleatorio correlacionados espacialmente.....	39

CAPÍTULO III

Figura: 3.1 Estaciones fuera y dentro de la cuenca Guadalquivir.....	42
Figura: 3.2 Años de registro de precipitaciones diarias período 1980-2016.....	43

Figura: 3.3 Años de registro de temperaturas diarias máximas y mínimas diarias período 1980-2016.....	45
Figura: 3.4 Precipitaciones diarias estación Campanario.....	47
Figura: 3.5 Temperaturas mínimas estación Campanario.....	48
Figura: 3.6 Temperaturas máximas estación Campanario.....	48
Figura: 3.7 Histograma de datos faltantes de precipitaciones diarias.....	50
Figura: 3.8 Histograma de datos faltantes de temperaturas mínimas.....	50
Figura: 3.9 Histograma de datos faltantes de temperatura máximas.....	51
Figura: 3.10 Zona 1 estación La Merced.....	53
Figura: 3.11 Zona 2 estaciones Chocloca y Ce.Na.Vit.....	54
Figura: 3.12 Zona 3 estaciones Turumayo y El Tejar.....	55
Figura: 3.13 Zona 4 estaciones San Luis de Palqui y Campanario.....	56
Figura: 3.14 Zona 5 estaciones Yesera Norte y Yesera Sur.....	57
Figura: 3.15 Zona 6 estaciones Huacata y Paicho Centro.....	58
Figura: 3.16 Zona 7 estaciones San Josecito y Qda.Cajas.....	59
Figura: 3.17 Curva Masa estación la Merced.....	60
Figura: 3.18 Datos rellenados vs Datos sin rellenar.....	62

CAPÍTULO IV

Figura: 4.1 Formato para los datos de las estaciones.....	70
Figura: 4.2 Formato para los datos de temperatura máxima.....	71
Figura: 4.4 Formato para los datos de temperatura mínima diaria.....	72
Figura: 4.4 Interfaz del programa RStudio.....	73
Figura: 4.5 Registro de los datos precipitaciones y temperaturas.....	82
Figura: 4.6 Formato GMET para la precipitación.....	84

Figura: 4.7 Formato GMET para la temperatura.....	87
Figura: 4.8 DEM para la cuenca Guadalquivir.....	88
Figura: 4.9 Código en R para transformar un archivo.tiff a nc.....	89
Figura: 4.10 Interfaz de linux.....	93
Figura: 4.11 Terminal de Linux.....	94
Figura: 4.12 Carpeta GMET.....	94
Figura: 4.13 Carpeta GMET.....	95
Figura: 4.14 Link para genera la regresión diaria.....	96
Figura: 4.15 Ejecución de la regresión diaria.....	97
Figura: 4.16 Visualización de la grilla diaria.....	98
Figura: 4.17 Namelist.params.....	99
Figura: 4.18 Link para generar los ensambles.....	99
Figura: 4.19 Generación de los ensambles.....	100
Figura: 4.20 Ensamble #1.....	100
Figura: 4.21 Ensamble #30.....	101
Figura: 4.22 Precipitación diaria 01-01-1980.....	102
Figura: 4.23 Temperatura media diaria 01-01-1980.....	103
Figura: 4.24 Precipitación mensual enero 1980.....	104
Figura: 4.25 Precipitación anual año 1980.....	105

CAPÍTULO V

Figura: 5.1 Precipitación media mensual.....	111
Figura: 5.2 Precipitación media anual.....	112
Figura: 5.3 Precipitación media anual zona 1.....	116
Figura: 5.4 Precipitación media anual zona 2.....	121

Figura: 5.5 Precipitación media anual zona 3.....	126
Figura: 5.6 Precipitación media anual zona 4.....	131
Figura: 5.7 Precipitación media anual zona 5.....	135
Figura: 5.8 Precipitación media anual zona 6.....	140
Figura: 5.9 Precipitación media anual zona 7.....	145
Figura: 5.10 Grilla de temperaturas medias diarias fecha 01-01-1981.....	148

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

Tabla 1.1 Balances Hídricos Superficiales de Bolivia.....	1
Tabla 1.2 Parámetros Morfológicos de la cuenca.....	25

CAPÍTULO II

Tabla 2.1 Parámetros mínimos.....	30
-----------------------------------	----

CAPÍTULO III

Tabla 3.1 Estaciones en el área de estudio.....	41
Tabla 3.2 Estaciones que tienen registro de precipitaciones.....	44
Tabla 3.3 Estaciones que tienen registro de temperaturas.....	46
Tabla 3.4 Correlación entre estaciones cercanas a la estación la Merced.....	54
Tabla 3.5 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones Chocloca y Ce.Na.Vit.....	55
Tabla 3.6 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones Turumayo y El tejar.....	56
Tabla 3.7 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones de San Luis de Palqui y Turumayo.....	57
Tabla 3.8 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones Yesera Norte y Yesera Sur.....	58
Tabla 3.9 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones de Huacata y Paicho Centro.....	59
Tabla 3.10 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones San Josecito y Qda. Cajas.....	60
Tabla 3.11 Coeficiente de correlacion de las curvas doble masa.....	61
Tabla 3.12 Estaciones que no se rellenaran.....	63

Tabla 3.13 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones de La Merced y Cañas.....	64
Tabla 3.14 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones Chocloca y Ce.Na.Vit.....	64
Tabla 3.15 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones de Turumayo y San Jacinto Sud.....	64
Tabla 3.16 Correlación entre estaciones cercanas a las estaciones de Tucumillas y Coimata.....	64
Tabla 3.17 Correlación entre estaciones cercanas a Tomayapo Pueblo.....	65
Tabla 3.18 Correlación entre estaciones cercanas a la estación Narvaez.....	65
Tabla 3.19 Temperaturas máximas medias anuales (°).....	66
Tabla 3.20 Temperaturas mínimas medias anuales (°).....	67

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1 Paquetes necesario para RStudio.....	74
Tabla 4.2 Coordinate Files.....	90
Tabla 4.3 Parámetros generados en la regresión diaria.....	91

CAPÍTULO V

Tabla 5.1 Métricas estadísticas de la precipitación en GMET a la escala de tiempo diaria para la cuenca del río Guadalquivir.....	109
Tabla 5.2 Métricas estadísticas de la precipitación en GMET a la escala de tiempo diario Balance Hídrico Superficial de Bolivia.....	110
Tabla 5.3 Precipitaciones anuales zona 1.....	113
Tabla 5.4 Estación Cañas y Juntas.....	114
Tabla 5.5 Estación Cañas y Juntas.....	115
Tabla 5.6 Precipitaciones Medias Anuales con mejor ajuste.....	117

Tabla 5.7 Precipitaciones Medias Anuales sin un buen ajuste.....	117
Tabla 5.8 Precipitaciones Anuales Zona 2.....	118
Tabla 5.9 Estaciones de Juntas y Pinos Sud.....	119
Tabla 5.10 Estaciones de Ce.Na.Vit. y Chocloca.....	120
Tabla 5.11 Precipitaciones Medias Anuales con mejor ajuste.....	122
Tabla 5.12 Precipitaciones Medias Anuales sin un buen ajuste.....	123
Tabla 5.13 Precipitaciones Anuales Zona 3.....	123
Tabla 5.14 Estaciones de Turumayo y El Tejar.....	124
Tabla 5.15 Estaciones de Tarija Aeropuerto y San Jacinto Sud.....	125
Tabla 5.16 Precipitaciones Medias Anuales con un buen ajuste.....	127
Tabla 5.17 Precipitaciones Anuales Zona 4.....	128
Tabla 5.18 Estaciones de Campanario y Coimata.....	129
Tabla 5.19 Estaciones de Tucumillas y San Luis de Palqui.....	130
Tabla 5.20 Precipitaciones Medias Anuales con un buen ajuste.....	132
Tabla 5.21 Precipitaciones Medias Anuales sin un buen ajuste.....	132
Tabla 5.22 Precipitaciones Anuales Zona 5.....	133
Tabla 5.23 Estaciones de Sella Quebradas, Yesera Norte y Yesera Sur.....	134
Tabla 5.24 Precipitaciones Medias Anuales con un buen ajuste.....	136
Tabla 5.25 Precipitaciones Medias Anuales sin un buen ajuste.....	136
Tabla 5.26 Precipitaciones Anuales Zona 6.....	137
Tabla 5.27 Estaciones de León Cancha, Tomayapo Pueblo y Trancas.....	138
Tabla 5.28 Estaciones de Huacata y Paicho Centro.....	139
Tabla 5.29 Precipitaciones Medias Anuales con un buen ajuste.....	141
Tabla 5.30 Precipitaciones Medias Anuales sin un buen ajuste.....	141

Tabla 5.31 Precipitaciones Anuales zona 7.....	142
Tabla 5.32 Estaciones de Alto Cajas y Narváz.....	143
Tabla 5.33 Estaciones de San Josecito y Qda. Cajas.....	144
Tabla 5.34 Precipitaciones Medias Anuales con un buen ajuste.....	146
Tabla 5.35 Precipitaciones Medias Anuales sin un buen ajuste.....	147
Tabla 5.36 Estación Aeropuerto temperatura mínima, media y máxima diaria fecha 01-01-1981.....	149
Tabla 5.37 Estación El Tejar temperaturas mínima, media y máxima diaria fecha 01-01-19181.....	149