

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL



**“EVALUACIÓN DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN DIARIA
SATELITAL CHIRPS PARA LA APLICACIÓN EN LOS ESTUDIOS
HIDROLÓGICOS DESARROLLADO EN LA CUENCA DEL RIO
TOLOMOSA DEL DEPARTAMENTO DE TARIJA – BOLIVIA”**

Por:

MAURICIO PAREJA COLQUE

SEMESTRE II - 2024

TARIJA – BOLIVIA

Dedicatoria

A mis padres, Manuel Jesús Pareja Choque y Lina Carolina Colque Domínguez, por darme su amor, comprensión, y aliento para seguir adelante.

A mi hermano, José Manuel Pareja Colque, por siempre brindarme su apoyo incondicional y su paciencia en momentos difíciles.

“Estoy convencido que la mitad de lo que separa a los emprendedores exitosos de los que han fracasado es la perseverancia”
(Steve Jobs)

INDICE GENERAL

RESUMEN	
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	3
1.2.1. Formulación del problema	4
1.3. Objetivos de la investigación	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Justificación	5
1.5. Delimitación de la investigación.....	6
1.5.1. Temática	6
1.5.2. Espacial	6
1.5.3. Temporal	6
1.6. Hipótesis.....	6
1.6.1. Identificación de variables	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes de la investigación	7
2.2. Fundamento Teórico.	8
2.2.1. El ciclo hidrológico	8
2.2.2. La precipitación.....	9
2.2.2.1. Formación de la precipitación	10
2.2.2.2. Precipitación según el proceso que la forma:.....	11
2.2.2.2.1. Precipitación convectiva.....	11
2.2.2.2.2. Precipitación orográfica.....	12

2.2.2.2.3. Precipitación frontal.	13
2.2.2.3. Precipitación según la forma en que cae	13
2.2.2.3.1. Llovizna	13
2.2.2.3.2. Lluvia.....	13
2.2.2.3.3. Chubasco	13
2.2.2.3.4. La nieve, el granizo y el pedrisco	14
2.2.3. Medidores de precipitación	14
2.2.3.1. Pluviómetros	14
2.2.3.2. Pluviógrafos	15
2.2.3.3. Radar Meteorológico.....	16
2.2.3.4. Sensores y satélites.....	17
2.2.4. Densidad mínima recomendada de estaciones pluviométricas	18
2.2.5. Nubes.....	18
2.2.5.1. Tipos de Nubes.....	19
2.2.5.1.1. Cirrus	19
2.2.5.1.2. Cúmulos.....	19
2.2.5.1.3. Estratos	19
2.2.5.1.4. Nimbos.....	20
2.2.6. Principios y Fundamento de Teledetección	20
2.2.6.1. Definición de Teledetección	20
2.2.6.2. Componentes de un sistema de Teledetección.....	21
2.2.6.3. Imágenes Satelitales.....	22
2.2.6.4. Resolución de las imágenes satelitales	22
2.2.6.5. Productos de teledetección de precipitación	23
2.2.7. Producto Satelital de Precipitación CHIRPS	23

2.2.7.1. Resolución espacial.....	24
2.2.7.2. Resolución temporal	24
2.2.8. Análisis de consistencia de las series de precipitación	25
2.2.8.1. Análisis gráfico – visual.....	25
2.2.8.2. Análisis Doble Masa	26
2.2.8.3. Análisis estadístico.....	27
2.2.8.4. Software Hydraces	28
2.2.8.5. Software Trend.....	29
2.2.9. Análisis estadístico de la magnitud de las precipitaciones.....	30
2.2.9.1. Error Medio (EM)	31
2.2.9.2. Error Medio Absoluto (EMA).....	31
2.2.9.3. Error Medio Absoluto Relativo (EMAR)	31
2.2.9.4. Eficiencia de Nash – Sutcliffe (NSE)	31
2.2.9.5. Sesgo (BIAS)	32
2.2.9.6. Coeficiente de Correlación de Pearson (r)	32
2.2.10. Análisis estadístico de la detección de los eventos de precipitación.....	32
2.2.10.1. Probabilidad de Detección (POD).	33
2.2.10.2. Relación de Falsa Alarma (FAR).....	33
2.2.10.3. Puntaje de Amenaza Equitativo (ETS).	33
2.2.10.4. Discriminador de Hansen y Kuipers (HSS).....	33
2.2.10.5. Puntaje de Habilidad de Heidke (HK).	34
2.2.10.6. Frecuencia de Bias (FB).	34
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	35
3.1. Enfoque de la investigación	35
3.2. Tipo de la Investigación	35

3.3. Diseño de la investigación.....	35
3.4. Método de Investigación	36
3.5. Población y tipo de muestreo	36
3.6. Técnicas de la investigación.....	37
3.7. Instrumentos de la investigación	37
3.8. Técnica de procesamiento de datos	37
3.9. Herramienta de procesamiento de datos.....	37
3.10. Descripción del desarrollo de la investigación.....	37
CAPÍTULO IV: APLICACIÓN PRÁCTICA E INTERPRETACIÓN DE LOS	
RESULTADOS	39
4.1. Descripción de la zona de estudio.....	39
4.1.1. Descripción general.....	39
4.1.2. Ubicación geográfica.....	39
4.2. Recopilación y análisis de la información de precipitación	41
4.2.1. Registro Histórico de precipitación de estaciones en tierra del SENAMHI ..	41
4.2.2. Registro Histórico de Precipitación del Producto Satelital CHIRPS.	55
4.3. Comparación estadística de la información satelital y las estaciones en tierra.	62
4.3.1. Comparación estadística de la información satelital (magnitud de las.....	
precipitaciones.....	62
4.3.2. Comparación estadística de la información satelital (detección de los eventos..	
de precipitación.....	71
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
5.1. Conclusiones	76
5.2. Recomendaciones.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	79
WEBGRAFÍA	80

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Estimación de la precipitación observada por satélites.....	3
Figura 2.1: El ciclo hidrológico.....	9
Figura 2.2: La precipitación.....	10
Figura 2.3: Esquema representativo del mecanismo de formación de precipitación ..	11
Figura 2.4: Precipitación por Convección.	12
Figura 2.5: Precipitación Orográfica.	12
Figura 2.6: Precipitación Frontal.	13
Figura 2.7: Pluviómetro.....	15
Figura 2.8: Pluviógrafo.....	15
Figura 2.9: Radar meteorológico.....	16
Figura 2.10: Satélite Meteorológico.....	18
Figura 2.11: Valores mínimos recomendados densidad de estaciones (superficie, en.... km ² por estación).....	18
Figura 2.12: Tipos de Nubes.....	19
Figura 2.13: Etapas del proceso de Teledetección	21
Figura 2.14: Descripción general del proceso y validación de CHIRPS.....	24
Figura 2.15: Análisis visual – gráfico.....	26
Figura 2.16: Curva Doble Masa.	27
Figura 2.17: Menú general del Software Hydracces	29
Figura 2.18: Interfaz Software Trend	30
Figura 4.1: Ubicación geográfica de la cuenca del río Tolomosa	40
Figura 4.2: Mapa de la cuenca río Tolomosa	40
Figura 4.3: Ubicación de las Estaciones Meteorológicas en tierra del SENAMHI.....	41
Figura 4.4: Registro Histórico de Precipitación de las Estaciones Meteorológicas	

Disponibles del SENAMHI.....	43
Figura 4.5: Mapa de ubicación Estaciones Meteorológicas con Datos Completos.....	
entre el periodo 2000 - 2021.....	44
Figura 4.6: Procesamiento Hydracces Análisis de Consistencia Visual Gráfico para la	
Estación Aeropuerto - Tarija.....	45
Figura 4.7: Procesamiento Hydracces Análisis de Consistencia Visual Gráfico para la	
Estación Coimata.....	45
Figura 4.8: Análisis de doble masa para determinar la estación base	47
Figura 4.9: Análisis de Doble Masa Estación San Jacinto Sud vs Estación.....	
Aeropuerto - Tarija.....	48
Figura 4.10: Análisis Doble Masa Estación San Jacinto Sud vs Estación Coimata.....	48
Figura 4.11: Corrección de los datos de la Estación Coimata mediante la curva de.....	
doble masa para los años (2014-2017)	49
Figura 4.12: Análisis de Consistencia Estación Aeropuerto–Tarija mediante el.....	
Software Trend.....	52
Figura 4.13: Estadísticos seleccionados en el Software Trend.....	53
Figura 4.14: Código JavaScript para la descarga de datos en GEE.....	55
Figura 4.15: Precipitación Satelital CHIRPS en GEE.....	56
Figura 4.16: Ubicación de la Estación Pinos Sud en GEE para la Descarga de Datos.....	57
Figura 4.17: Registro Histórico de Precipitación Diaria Satelital CHIRPS Estación	
Pinos Sud en GEE.....	57
Figura 4.18: Malla de Precipitación Satelital CHIRPS en Arcgis.....	58
Figura 4.19: Distribución de la precipitación media mensual de la Estación Aeropuerto	
- Tarija y el producto satelital CHIRPS para el periodo 2000 - 2021.....	59
Figura 4.20: Distribución de la precipitación media mensual de la Estación San	
Andrés y el producto satelital CHIRPS para el periodo 2000 - 2021.....	59
Figura 4.21: Distribución de la precipitación media mensual de la Pinos Sud y el	

producto satelital CHIRPS para el periodo 2000 - 2021.....	60
Figura 4.22: Curvas de masa simple entre estaciones tierra y el producto satelital CHIRPS.....	61
Figura 4.23: Resultados de EM mensual multianual de la estimación de precipitaciones diarias entre producto Satelital y las Estaciones tierra entre 2000 y 2021.	64
Figura 4.24: Resultados de EMA mensual multianual de la estimación de precipitacion diarias entre producto Satelital y Estaciones tierra entre 2000 y 2021	64
Figura 4.25: Resultados de EMAR mensual multianual de la estimación precipitaciones diarias entre producto Satelital y Estaciones tierra entre 2000 y 2021	65
Figura 4.26: Resultados de NSE mensual multianual de la estimación precipitaciones diarias entre producto Satelital y Estaciones tierra entre 2000 y 2021	65
Figura 4.27: Resultados de Bias mensual multianual de la estimación precipitaciones.. diarias entre producto Satelital y Estaciones tierra entre 2000 y 2021	66
Figura 4.28: Datos de precipitación diaria del producto satelital y la estación Pinos Sud para los meses de enero a marzo.....	68
Figura 4.29: Datos de precipitación diaria del producto satelital y la estación Pinos Sud para los meses de abril a septiembre.....	69
Figura 4.30: Datos de precipitación diaria del producto satelital y la estación Pinos Sud para los meses de octubre a diciembre.....	69
Figura 4.31: Resultados de “r” mensual multianual de la estimación de precipitaciones diarias entre producto Satelital y Estaciones tierra entre 2000 y 2021	71
Figura 4.32: Estadísticas de validación categórica (POD, FAR, ETS, HK, HSS y FB).... de los productos satelitales en comparación con el conjunto de datos de.... validación independiente para cada mes.....	74

INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Estaciones Meteorológicas disponibles del SENAMHI.....	42
Tabla 4.2: Estaciones Meteorológicas Sin Datos Faltantes entre 2000 – 2021	43
Tabla 4.3: Datos ordenados de precipitación mensual para el periodo 2000 – 2021 de. la Estación Aeropuerto – Tarija para cargar al software Trend.	50
Tabla 4.4: Resultados de análisis de consistencia en el software Trend de la estación... Aeropuerto – Tarija para el periodo 2000 - 2021	53
Tabla 4.5: Resultados del Análisis de Consistencia en el Software TREND.....	54
Tabla 4.6: Características del Producto Satelital CHIRPS	55
Tabla 4.7: Resultados del producto satelital CHIRPS en la estimación de la magnitud. de las precipitaciones diarias para cada una de las estaciones tierra entre..... 2000 - 2021	62
Tabla 4.8: Porcentaje de Variación promedio de las precipitaciones diarias entre el producto satelital y las Estaciones tierra entre 2000-2021	67
Tabla 4.9: Resultados de los Coeficientes de Correlación entre las precipitaciones..... diarias del producto satelital y las mediciones de las estaciones en tierra..... periodo 2000 y 2021	70
Tabla 4.10: Valores de coeficiente de Pearson.....	70
Tabla 4.11: Resultados del desempeño de los productos satelitales en la detección de.. eventos diarios de precipitación para el periodo entre 2000 y 2021	72

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Series de precipitación diaria estaciones meteorológicas SENAMHI

ANEXO 2: Análisis de Consistencia Procesamiento Software Hydracces

ANEXO 3: Análisis de Consistencia Doble Masa

ANEXO 4: Análisis de Consistencia Software Trend

ANEXO 5: Coeficientes de correlación de las Estaciones Meteorológicas Vs. Producto
Satelital CHIRPS