



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA MEDIANTE EL USO DE
PRECIPITACIONES OBTENIDAS POR SATÉLITE EN LA CUENCA DEL
RÍO RAMIS PERÚ**

PRESENTADO POR:

EDWIN LLANQUE CHAYÑA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS

PUNO - PERÚ

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AGRÍCOLA

TESIS

**MODELACION HIDROLÓGICA MEDIANTE EL USO DE
PRECIPITACIONES OBTENIDAS POR SATÉLITE EN LA CUENCA DEL
RÍO RAMIS PERÚ**

PRESENTADO POR:

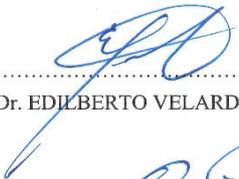
EDWIN LLANQUE CHAYÑA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:

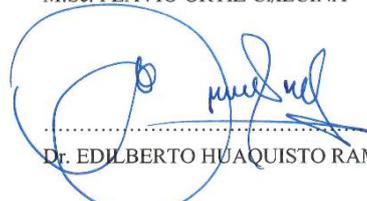
PRESIDENTE


.....
Dr. EDILBERTO VELARDE COAQUIRA

PRIMER MIEMBRO


.....
M.Sc. FLAVIO ORTIZ CALCINA

SEGUNDO MIEMBRO


.....
Dr. EDILBERTO HUAQUISTO RAMOS

ASESOR DE TESIS


.....
D.Sc. EFRAIN LUJANO LAURA

Puno, 21 de julio del 2022

ÁREA: Ciencias de la Ingeniería.

TEMA: Modelación hidrológica con precipitación de satélite.

LÍNEA: Recursos hídricos.



DEDICATORIA

Debo agradecer sinceramente a mis padres Benito y Lucila quienes apoyaron para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la tranquilidad que son necesarios para realizar la Tesis, gracias a ellos nunca me sentí solo.

A mi hija Mayra Zhamira que se convirtió en la razón de cada acción que tomo en esta vida.

A mi pareja Yudith, por su comprensión y aliento, por haber soportado a mi lado tantas vicisitudes.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Efraín Lujano Laura director de la Tesis, por su interés, apoyo y orientación en el desarrollo de este trabajo durante todo este tiempo.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a todos los docentes de la MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE RECURSOS HÍDRICOS y a la Universidad Nacional del Altiplano Puno, por sus aportes en beneficio de mi formación académica.

También agradezco a todas las personas que me ayudaron desde la distancia a recopilar la información.



ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|---------------------|-------------|
| DEDICATORIA | i |
| AGRADECIMIENTOS | ii |
| ÍNDICE GENERAL | iii |
| ÍNDICE DE TABLAS | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| ÍNDICE DE ANEXOS | ix |
| ÍNDICE DE ACRÓNIMOS | x |
| RESUMEN | xi |
| ABSTRACT | xii |
| INTRODUCCIÓN | 1 |

CAPÍTULO I.2

REVISIÓN DE LITERATURA 2

| | |
|---|---|
| 1.1. Marco Teórico | 2 |
| 1.1.1. Principios y fundamentos de la teledetección | 2 |
| 1.1.1.1. Componentes de un sistema de teledetección | 2 |
| 1.1.2. Satélites | 3 |
| 1.1.2.1. Satélites estacionarios (Geosincrónicos) | 3 |
| 1.1.2.2. Satélites de órbita (Heliosíncronos) | 3 |
| 1.1.3. Sensores remotos | 4 |
| 1.1.3.1. Radiación electromagnética | 4 |



| | |
|---|----|
| 1.1.3.2. Espectro electromagnético | 5 |
| 1.1.4. Imágenes satelitales | 5 |
| 1.1.4.1. Resolución de las imágenes | 6 |
| 1.1.5. Meteorología | 7 |
| 1.1.6. Variables meteorológicas | 7 |
| 1.1.6.1. La temperatura | 8 |
| 1.1.6.2. El viento | 8 |
| 1.1.6.3. La humedad | 8 |
| 1.1.6.4. Vapor de agua | 8 |
| 1.1.6.5. Precipitación atmosférica | 8 |
| 1.1.7. Observaciones meteorológicas | 9 |
| 1.1.8. Satélites meteorológicos | 9 |
| 1.1.9. Imágenes más utilizadas | 10 |
| 1.1.9.1. Imágenes visibles (VIS) | 10 |
| 1.1.9.2. Imágenes infrarrojas (IR) | 10 |
| 1.1.10. Satélites TRMM-3B42 (Tropical Rainfall Measuring Mission | 11 |
| 1.1.11. Sistema PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks) | 12 |
| 1.1.12. Evaluación de datos satelitales | 12 |
| 1.1.13. Modelo hidrológico SWAT | 13 |
| 1.2. Antecedentes | 15 |

CAPÍTULO II.21

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 21



| | |
|----------------------------------|----|
| 2.1. Identificación del problema | 21 |
| 2.2. Enunciados del problema | 22 |
| 2.2.1. Interrogante general | 22 |
| 2.2.2. Interrogantes específicos | 22 |
| 2.3. Justificación | 22 |
| 2.4. Objetivos | 23 |
| 2.4.1. Objetivo general | 23 |
| 2.4.2. Objetivos específicos | 23 |
| 2.5. Hipótesis | 24 |
| 2.5.1. Hipótesis general | 24 |
| 2.5.2. Hipótesis específica | 24 |

CAPÍTULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

| | |
|--|----|
| 3.1. Lugar de estudio | 25 |
| 3.2. Población | 26 |
| 3.3. Muestra | 27 |
| 3.3.1. Topografía, uso de la tierra y clase de suelo | 27 |
| 3.3.1.1. Topografía | 27 |
| 3.3.1.2. Uso de la tierra | 27 |
| 3.3.1.3. Clase de suelo | 28 |
| 3.3.1. Mediciones hidrometeorológicas | 29 |
| 3.3.2. Estimaciones de precipitación basadas en satélite | 31 |



| | |
|--|----|
| 3.3.2.1. Producto de precipitación PERSIANN-CDR | 31 |
| 3.3.2.2. Producto de precipitación TRMM-3B42. | 31 |
| 3.4. Método de investigación | 32 |
| 3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos | 32 |
| 3.5.1. Evaluación de los datos de precipitación estimada por los satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR con mediciones pluviométricas | 32 |
| 3.5.2. Evaluación de los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR como entrada en la modelación hidrológica | 36 |
| CAPÍTULO IV. 40 | |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN⁴⁰ | |
| 4.1. Evaluación de los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR con mediciones pluviométricas | 40 |
| 4.2. Evaluación de los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR como entrada en la modelación hidrológica | 43 |
| CONCLUSIONES | 47 |
| RECOMENDACIONES | 48 |
| BIBLIOGRAFÍA | 49 |
| ANEXOS | 58 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| 1. Características de los datos utilizados. | 29 |
| 2. Características de las estaciones hidrometeorológicas. | 30 |
| 3. Resumen de las principales características de los productos PERSIANN-CDR y TRMM-3B42. | 32 |
| 4. Parámetros iniciales para calibración en el modelo SWAT. | 38 |
| 5. Resultados de indicadores estadísticos. | 43 |
| 6. Parámetros calibrados del modelo SWAT. | 44 |
| 7. Indicadores estadísticos para las simulaciones de caudal utilizando diferentes conjuntos de datos de lluvia. | 46 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| 1. Satélites geoestacionarios y de órbita polar. | 4 |
| 2. Figura espectro electromagnético. | 5 |
| 3. Representación de una imagen satelital. | 6 |
| 4. Localización geográfica de la cuenca Ramis. | 26 |
| 5. Características de a) altitud, b) uso de la tierra, c) clase de suelo y d) pendiente. | 28 |
| 6. Diagrama de dispersión entre precipitaciones observadas y PERSIANN-CDR. | 41 |
| 7. Diagrama de dispersión entre precipitaciones observadas y TRMM-3B42. | 42 |
| 8. Hidrograma de caudales observados y simulados mediante el uso de a) precipitaciones observadas, b) PERSIANN-CDR, c) TRMM-3B42. | 46 |



ÍNDICE DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| 1. Código CLIMATOL. | 58 |
| 2. Código descarga precipitaciones PERSIANN-CDR (Google Earth Engine). | 59 |
| 3. Código descarga precipitaciones TRMM-3B42 (Google Earth Engine). | 60 |
| 4. Gráfico de reconstrucción de series completas. | 62 |



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

| | |
|-----------------|--|
| PNT | : Predicción numérica del tiempo. |
| OMM | : Organización Meteorológica Mundial. |
| SENAMHI | : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. |
| VIS | : Imágenes Visibles. |
| IR | : Imágenes Infrarrojos. |
| TRMM | : Misión de Medición de Precipitaciones Tropicales. |
| PERSIANN | : Precipitación a partir de Información de Detección Remota Usando Redes Neuronales Artificiales. |
| SWAT | : Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas. |
| URHs | : Unidades de Respuesta Hidrológica |

RESUMEN

En los últimos años, muchos investigadores han orientado sus estudios a aprovechar los beneficios que se pueden obtener a través de las Estimaciones de Precipitación Basadas en Satélite (EPB), en escalas de tiempo diarias, mensuales y anuales. El uso de EPBs es una de las alternativas para solucionar el problema de las cuencas con poco o ningún instrumento. El objetivo de la investigación es evaluar estimaciones de precipitación basadas en satélites, utilizando modelación hidrológica en la cuenca del río Ramis, Perú. La evaluación se llevó a cabo durante 16 años (2003 - 2019), utilizando EPBs, Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM-3B42) y Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks- Climate Data Record (PERSIANN-CDR). Los resultados de la comparación con estaciones meteorológicas indican que PERSIANN-CDR es mejor que TRMM-3B42 con $r = 0.50$ y 0.38 respectivamente. Sin embargo, el uso de las EPBs como datos de entrada en el modelo hidrológico, Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT), los resultados obtenidos calibrados para TRMM-3B42 son insatisfactorios, con $r = 0.77$, $NSE = -0.24$ y el porcentaje de sesgo $PBIAS = 56.50\%$, para PERSIANN-CDR con $r = 0,63$, $NSE = -0,01$ y $PBIAS = 62.30\%$. Obteniendo un buen resultado $r = 0.86$ y $NSE = 0,73$ al utilizar las medidas de las estaciones meteorológicas. La evaluación de los datos de entrada en el modelo hidrológico muestra la magnitud del error de los EPBs, cuyos datos de entrada deben ser corregidos antes de ser utilizados.

Palabras clave: Cuenca del río Ramis, Modelización hidrológica, Productos de precipitación satelital, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42.

ABSTRACT

In recent years, many researchers have targeted their studies to take advantage the benefits that can be obtained through Satellite-based Precipitation Estimates (EPBs), on daily, monthly and annual time scales. The use of EPBs is one of the alternatives to solve the problem of basins with little or any instruments. The research objective is to evaluate precipitation estimates based on satellites, using hydrological modeling in the Ramis river basin, Peru. The evaluation was carried out during 16 years (2003 - 2019), using EPBs, Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM-3B42) and the Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks- Climate Data Record (PERSIANN-CDR). The results of the comparison with weather stations indicate that PERSIANN-CDR is better than TRMM-3B42 with $R^2 = 0.50$ and 0.38 respectively. However, using the EPBS as input data in the hydrological model, Soil and Water Assessment Tool (SWAT), the results obtained calibrated for TRMM-3B42 are unsatisfactory, with $r = 0.77$, $NSE = -0.24$ and the percentage bias ($PBIAS = 56.50\%$), for PERSIANN-CDR with $r = 0,63$, $NSE = -0,01$ y $PBIAS = 62.30\%$. Obtaining a good result $r = 0.86$ y $NSE = 0,73$ when using the measurements of the meteorological stations. The evaluation of input data in the hydrological model show the magnitude of the EPBs error, which input data must would be corrected before being used.

Keywords: Ramis River Basin, Hydrological Modeling, Satellite Precipitation Products, PERSIANN-CDR, TRMM-3B42

INTRODUCCIÓN

La precipitación es uno de los componentes principales del ciclo hidrológico. Su utilidad, causa el interés en muchos profesionales inmersos en estudios especializados de meteorología, hidrológica, ecología y agricultura. Las precipitaciones son datos registrados por pluviómetros por los Servicios Meteorológicos Nacionales, sus limitaciones temporales como la falta de información completa, descalibración de equipos, la baja cobertura espacial, altos costos de mantenimiento y muchas veces no se tiene mediciones de precipitaciones por inaccesibilidad al lugar. Como consecuencia se tiene la ausencia de información y un alto grado de sesgo o errores en las lecturas.

En la actualidad, se hace más frecuente el uso de las precipitaciones obtenidas a partir de las imágenes satelitales que proporcionan información cuadriculada como es el caso de PERSIANN-CDR y TRMM-3B42, proporcionadas gratuitamente a distintas escalas temporal y espacial. Varios estudios documentaron los errores de los productos satelitales, Wiwoho et al., (2021). Mencionan que los errores de estimación les permiten reconocer e incorporar los errores de estimación en las aplicaciones hidrológicas. Los errores de estimación también brindan información para implementar y mejorar a los desarrolladores de algoritmos. Dado que los errores de estimación varían de una región a otra, se requiere un esfuerzo de validación integral en diferentes regiones geográficas para mejorar la usabilidad de los productos satelitales a nivel mundial. Uno de los modelos hidrológicos utilizados ampliamente para evaluar las EPBS es la Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT), esta herramienta nos ha permitido alcanzar uno de los objetivos de calibrar y validar el flujo de agua utilizando diferentes productos de precipitación y compararlos los caudales observados (Cha et al., 2014).

La presente investigación esta estructura de la siguiente forma: Introducción, Capítulo I Revisión de literaria, comprende el marco teórico y los antecedentes; Capítulo II Planteamiento del problema, contiene la definición del problema, justificación, objetivos e hipótesis de la investigación; Capítulo III Materiales y métodos, contiene el lugar de estudio, muestra utilizada y la metodología utilizada para cada objetivo específico; Capítulo IV resultados y discusión; bibliografía y los Anexos.

CAPÍTULO I.

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Principios y fundamentos de la teledetección

Define a la teledetección como la interacción energética de la reflexión solar o energía artificial entre la superficie terrestre y los sensores aéreos espaciales. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor sea almacenado convenientemente, bien a bordo del satélite, bien en las estaciones receptoras, de cara a que pueda interpretarse para una determinada aplicación (Chuvieco, 2008).

1.1.1.1. Componentes de un sistema de teledetección

Los elementos involucrados en un proceso de teledetección incluye los siguientes elementos (Chuvieco, 2008):

- a) **Fuente de energía**, Flujo energético detectado por el sensor, esta emitido por la energía solar.
- b) **Cubierta terrestre**, Reflejo emitido por las distintas características físicas formado por masas de vegetación, suelo, agua y construcciones humanas.
- c) **Sensor**, Plataforma que tiene como misión captar la energía procedente de la cubierta terrestre.
- d) **Sistema de recepción**, información transmitida desde la plataforma al interprete con correcciones y formatos apropiados.

- e) **Intérprete**, Elemento que analizada las imágenes analógicas convirtiéndolo en información temática o cuantitativa.
- f) **Usuario final**, interprete encargado de realizar el análisis.

1.1.2. Satélites

Rosiek & Batlles (2004) afirman que la ventaja de los satélites es proporcionar información de cobertura espacial y temporal. Algunos datos de satélite están disponibles en tiempo real y otros tienen retardos de días o meses, pero son más eficaces que los de estaciones convencionales que pueden estar disponibles después de más tiempo (Balcázar et al., 2019). Los satélites recorren un espacio con características particulares para cumplir cierto tipo de misión, el movimiento de un satélite está definido por parámetros orbitales que trazan la rotación en torno a la tierra, la forma en que se produce el movimiento son dos tipos de órbitas para un satélite (Olaya, 2014).

1.1.2.1. Satélites estacionarios (Geosincrónicos)

Olaya (2014) afirma que los satélites se sitúan sobre un punto fijo de la Tierra y sigue la rotación de esta. Es decir, no existe movimiento del satélite con respecto a la superficie terrestre. Las imágenes se toman con mismo encuadre y cubren la misma extensión, la ventaja de este tipo de satélite se puede contar con información actualizada, la desventaja radica en las zonas alejadas del punto se tendrá una mala cobertura o no cubiertas.

1.1.2.2. Satélites de órbita (Heliosíncronos)

Olaya (2014) afirma que estos satélites realizan un movimiento de rotación alrededor de la tierra, lo que hace a cada vuelta cubra distintas zonas, se consigue cubrir la totalidad de la superficie terrestre, la órbita está diseñada para situarse en el punto inicial a la misma hora solar exacta y condiciones similares.

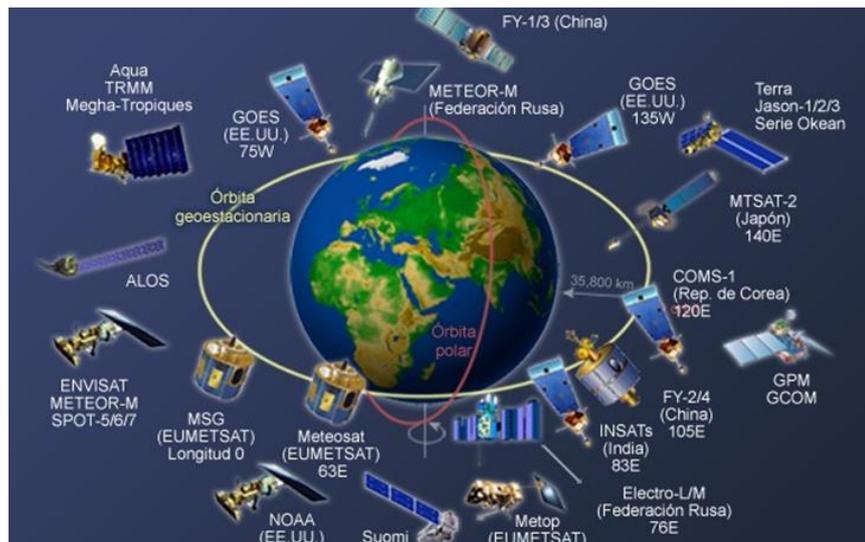


Figura 1. Satélites geostacionarios y de órbita polar.

Fuente: <https://laprensa7dias.com/los-satelites-de-la-tierra-quien-posee-nuestra-orbita-2/>

1.1.3. Sensores remotos

Es la información obtenida de un objeto sin tener contacto físico, para este caso es ampliamente utilizado la teledetección utilizando mecanismos de captura de espectros de radiación por los satélites. Actualmente los sensores remotos son utilizados como una herramienta para el relevamiento de suelos, recursos forestales, estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, urbanismo y una serie de usos más, siendo la de nuestro interés los del tipo meteorológico (Melgarejo et al., 2013).

1.1.3.1. Radiación electromagnética

La radiación solar interactúa con la atmosfera absorbiendo los componentes vapor de agua, nitrógeno, oxígeno, etc. Los que son reflejados en forma de longitud de onda, que posee las características espectrales (Gómez, 2009).

Así mismo OMM, (1994) menciona la teledetección activa se usa para las mediciones puntuales de zonas, los métodos pasivos es la radiación electromagnética (desde el infrarrojo hasta el violeta y pocas veces el ultravioleta), la aplicación analizador multiespectro se encuentra instalado en los satélites, El radar actualmente mide la intensidad de lluvia, masas de agua, la posibilidad de medir la humedad del suelo y otros usos limitados en la hidrología.

1.1.3.2. Espectro electromagnético

Ormeño Villajos (2006) define a la radiación electromagnética como una distribución continua de longitudes de onda y frecuencias, desde las longitudes de onda cortas y altas frecuencias de las ondas cósmicas, hasta las largas longitudes de onda y bajas frecuencias de las ondas de radio, la banda del infrarrojo inicia la longitud de onda del orden de 1mm hasta 0,7 micras a la vez se subdivide en regiones submilimétricas (IR lejano, IR medio e IR próximo) en esta región ocurre gran parte de la radiación electromagnética debido a la rotación y vibración de las moléculas que son usadas para la teledetección.

La explicación de niveles electrónicos se encuentra en la interacción onda-materia, que utiliza principalmente el estudio de atmosferas planetarias y la atmosfera en la opacidad de gases en la longitud de onda.

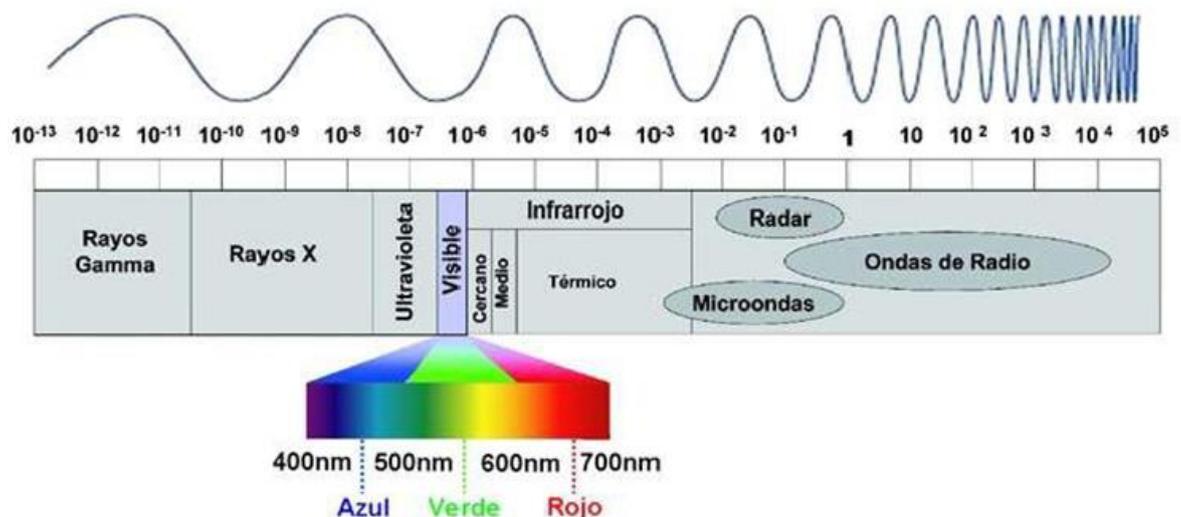


Figura 2. Figura espectro electromagnético.

Fuente: (Oñorbe, 2016).

1.1.4. Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales están conformadas por información de sistema integrado de datos del territorio, que abarcan zonas amplias proporcionado por sensores. Vargas et al. (2013) menciona que casi todos los satélites comerciales de teledetección captan imágenes utilizando sensores digitales que funcionan según los mismos principios que las cámaras digitales, los sensores satelitales son detectores diminutos que miden la cantidad de radiación electromagnética reflejada por la superficie de la tierra y los

objetos que hay en ella, estas mediciones se denominan valores de reflectancia que registran valores numéricos digitales estos se convierten en colores o matices de gris creando una imagen que se parece a una fotografía.

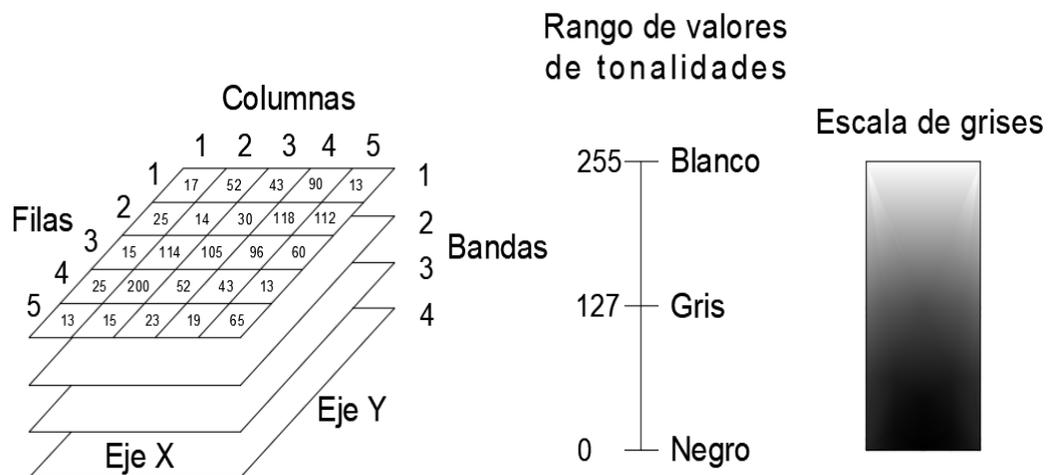


Figura 3. Representación de una imagen satelital.

Fuente: (Aguirre, 2009).

1.1.4.1. Resolución de las imágenes

Galindo et al. (2014) detalla con el que se es posible identificar los elementos sobre las imágenes y se relaciona con la unidad mínima de almacenamiento de datos o píxel.

- Resolución espacial.** Es el objeto más pequeño que se puede distinguir sobre una imagen, la unidad de longitud se mide como el número de píxeles por unidad de medida (milímetros sobre la imagen, metros sobre la imagen), depende de la longitud focal y la altura sobre la superficie terrestre.
- La resolución espectral.** Son longitudes de onda que ofrecen información a través de películas pancromáticas, infrarrojo blanco negro, color natural o infrarrojo color.
- Resolución radiométrica.** Cantidad de energía medida en la escala radiométrica, para el caso de imágenes se mide el almacenamiento del número

de niveles de gris, para evaluar la calidad radiométrica se denomina “bit number”.

- d) Resolución temporal.** Es la frecuencia de un satélite capaz de obtener imágenes, o también llamado periodo de revisita, la utilidad más común son los estudios multitemporales o evolutivos.

1.1.5. Meteorología

Luis & Hourcade (2002) refiere que la aportación más considerable de la historia es Claudio Tolomeo, Fue un conocido astrónomo, geógrafo y astrólogo alejandrino que vivió entre el fin del primer siglo, escribió un tratado titulado “Tetrabiblos” en el que se concentra en los pronósticos meteorológicos, con la peculiaridad de que los fundamenta en las disposiciones astronómicas, El final de una nueva época en la que la meteorología será una parte de la Física, lo pondrá Descartes con su obra “Los Meteoros”

La Meteorología necesitaba los instrumentos necesarios con los que poder medir y experimentar con la nueva mentalidad, pero también requería de nuevas teorías que orientaran la experimentación. Unas y otros, teorías e instrumentos, fueron paulatinamente apareciendo, mejorándose, afinándose para constituir en un penúltimo paso, la meteorología como rama de la Física.

Por otra parte Jiménez et al. (2004) menciona que la meteorología es la ciencia encargada del estudio de la atmósfera, de sus propiedades y de los fenómenos que en ella tienen lugar, los llamados meteoros, las variables meteorológicas que se estudia son la temperatura, presión atmosférica y humedad que varían en espacio y tiempo, a estos fenómenos se intenta explicar sus causas basados en conocimientos de la física conjuntamente con tecnología moderna avanzada capaces de predecir el tiempo con una semana de antelación sin tener fallas.

1.1.6. Variables meteorológicas

Gutierrez (2014) afirma que el principal agente causante de los cambios atmosféricos, por ende, el clima, es el agua en sus diferentes fases, de ahí que la hidrología esté enlazada troncalmente con la meteorología y la climatología, el estudio inicia con la

microfísica de las nubes, previsión meteorológica pasando hasta los balances energéticos, turbulencia y sistemas convectivos todos basados en el factor agua.

Jiménez et al. (2004) da a conocer los principales parámetros meteorológicos que interesan a la hidrología.

1.1.6.1. La temperatura

Es una de las magnitudes más utilizadas para describir el estado de la atmosfera. De hecho, la temperatura varía entre el día y la noche, entre una estación y otra estación también varia la temperatura en diferentes ubicaciones geográficas llegando en invierno a menos 0°C por debajo y en verano supera los 40°C

1.1.6.2. El viento

Es el movimiento del aire de una zona a otra, las causas que originan este movimiento es la diferencia de presión o de temperatura entre dos puntos, si la presión del aire es distinta, este tiende a moverse desde la zoma con mayor presión hacia la zoma con menor presión, lo que ocurre es la diferencia de presión entre ambos extremos.

1.1.6.3. La humedad

La humedad es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire, la cantidad de vapor de agua no es constante, depende de diversos factores, las precipitaciones recientes, cercanía a masas de agua y las plantas.

1.1.6.4. Vapor de agua

En las imágenes la radiación genera información de vapor de agua sobre las áreas libres y nubosidad, las imágenes de vapor de agua son útiles para observar regiones secas y húmedas, también proporciona información sobre los patrones de corrientes de vientos, el color oscuro indica aire seco, mientras los colores más brillantes indican aire húmedo (Melgarejo et al., 2013).

1.1.6.5. Precipitación atmosférica

Las nubes están formadas por una gran cantidad de gotas minúsculas y cristalinos de hielo, esto procede del cambio de estado vapor de agua que se encuentra en el aire, que al ascender a la atmosfera se enfría hasta llegar la saturación.

1.1.7. Observaciones meteorológicas

Jiménez et al. (2004) afirma que la observación y medida de las variables y fenómenos meteorológicos es una condición indispensable para el avance de la meteorología, se realiza mediciones a través de estaciones meteorológicas ubicados a diferentes alturas sobre la superficie terrestre otros se ubican sobre el mar, rutas trazadas por los barcos y aviones aprovechando que se encuentran equipados con instrumentos meteorológicos.

1.1.8. Satélites meteorológicos

Existen distintos tipos de observaciones, la más común son las realizadas in situ a través de observadores ubicados en una garita y estaciones automáticas la información que nos brinda tiene un alto grado de precisión. Por otro lado, están las observaciones realizadas mediante la teledetección estos son asimilados por modelos matemáticos con la finalidad de mejorar la información.

Marcos (2018) menciona que las observaciones de los satélites meteorológicos son sistemas complejos, la posición que ocupan alrededor de la tierra les permite tener una visión privilegiada y una visión más amplia que los aparatos situados en la superficie terrestre, los satélites captan determinadas frecuencias de radiación de distinta intensidad, esto depende de las condiciones atmosféricas capta información de la radiación electromagnética de tipo visible e infrarrojo a partir de esta información se elaboran las imágenes que reciben el nombre de banda de espectro.

La instrumentación adecuada en los satélites captan información de las propiedades de la tierra a través de la radiación electromagnética de tipo visible e infrarrojo, Si las imágenes recibidas se colocan unas tras otras, visualizándose como secuencia, podremos apreciar los movimientos de las nubes, tal y como el hombre del tiempo nos muestra a diario en televisión (Jiménez et al., 2004).

Según la OMM (2019) indica que las observaciones por satélite son fuente para PNT mundial siendo un factor significativo en la caracterización, comprensión, mejora en aciertos, predicciones y realización de modelos del sistema tierra, en las políticas de vigor de la OMM los datos no son suficiente claras en cuanto a la importancia de intercambiar observaciones de teledetección y los requisitos para hacerlo.

1.1.9. Imágenes más utilizadas

Los satélites para la meteorología utilizan distintos instrumentos a bordo para medir las ondas en bandas y dar información sobre la atmosfera según el tipo de radiancia, que se almacenan como valores digitales en matrices bidimensionales de pixeles.

1.1.9.1. Imágenes visibles (VIS)

Jiménez et al. (2004) indica que las imágenes visibles constituyen una imagen muy similar a la que percibiríamos si nos situásemos sobre el satélite, puesto que, al igual que harían nuestros ojos, el satélite capta la radiación solar tras reflejarse sobre las nubes, la tierra o el mar, dependiendo de la zona, el brillo de una imagen depende tres factores 1) intensidad de la radiación solar, 2) Angulo de elevación del sol y 3) reflectividad del cuerpo observado, generalmente las nubes son buenos reflectores, su albedo depende del espesor y la naturaleza de las partículas que las constituyen, una nube delgada formada por cristales de hielo, apenas refleja la radiación solar por lo que es difícil identificar en una imagen son casi transparentes. Por su parte Melgarejo et al. (2013) indica que la imagen muestra la nubosidad reflejada por la luz solar y no reproduce imágenes nocturnas, en las imágenes se puede observar áreas de color brillantes corresponden a nubes más espesas y tiene mayor albedo que las nubes de menor espesor, algunas veces es difícil distinguir las nubes bajas, medias y altas debido a que poseen un albedo similar, para realizar esta distinción se utilizan imágenes de espectro infrarrojo.

1.1.9.2. Imágenes infrarrojas (IR)

Un cuerpo emite una intensidad de radiación infrarrojo que esta relacionado directamente con la temperatura por lo que se puede determinar una nube alta y fría, aparecerá muy brillante en una imagen de este tipo, si hay nubes por encima una cobertura, se vera como una zona muy oscura en la imagen, debido a su temperatura elevada, las imágenes infrarrojo determinan el color en función a la emisión de la temperatura de los cuerpos, las imágenes IR impiden distinguir bien las nubes bajas y las nieblas, puesto que como su temperatura es parecida a la de la superficie donde se encuentran, podrían confundirse con ésta (Jiménez et al., 2004).

Por su parte Melgarejo et al.(2013) menciona que la imagen de radiación infrarroja, es utilizada para ver las temperaturas de los cuerpos tales como nube, cobertura

nubosa y capaz de reproducir imágenes nocturnas. En la imagen de infrarrojo las temperaturas más calientes están dados por los objetos oscuros y los claros indican temperaturas más frías.

1.1.10. Satélites TRMM-3B42 (Tropical Rainfall Measuring Mission)

Tan & Santo (2018) indican que TRMM-3B42 es la primera misión satelital dedicada a monitorear condiciones de precipitación subtropical. Se lanzó el satélite TRMM-3B42 en 1997 desde el Centro Espacial Tanegashima en Tanegashima, Japón, por NASA y JAXA. El satélite estaba equipado con radar de precipitación. (PR), cámara de imágenes de microondas TRMM-3B42 (TMI), sensor de imágenes de iluminación (LIS), las nubes y el sistema de energía radiante de la Tierra (CERES), así como Sensor visible e infrarrojo (VIRS). Opera en órbita terrestre baja (LEO), con 400 km de altitud, una inclinación de 35° y órbitas alrededor Tierra alrededor de 16 veces al día.

Por otra parte Tan (2019) indica que el TRMM-3B42 es una misión satelital conjunta entre la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio para ser pionera en el estudio de la precipitación tropical y subtropical para la investigación del clima y el clima. La nave espacial TRMM-3B42 había dejado de orbitar la Tierra a mediados de junio de 2015, después de 17 años de recopilación de datos. TMPA es uno de los SPP desarrollados a partir de la misión TRMM-3B42. Las principales entradas de los productos TMPA son los datos pasivos de microondas recopilados por satélites de órbitas terrestres bajas (es decir, Microondas Imager en TRMM-3B42) y los datos infrarrojos de canal de ventana ($\sim 10.7 \mu\text{m}$) recopilados por la constelación internacional de satélites geosincrónicos de órbita terrestre.

De acuerdo a Huffman et al. (2007) TMPA se extiende de 50° S a 50° N y está disponible para el período de 1998 presente en escalas de 3 horas, diarias y mensuales. La escala espacial es de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, suficiente para estudiar el patrón de precipitación de las cuencas de ríos moderados a grandes. Básicamente, los SPP diarios de TMPA se pueden dividir en versión en tiempo real (3B42RT) e investigación (3B42V7). El sesgo del producto TMPA 3B42V7 se corrigió utilizando el Centro Global de Climatología de Precipitación (GPCC). Se puede encontrar una descripción detallada del algoritmo, datos de entrada y teoría de los productos TMPA.

1.1.11. Sistema PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks)

Chen et al. (2020) indica que PERSIANN-CDR es un algoritmo de recuperación de precipitación basado en satélites que se basa principalmente en datos IR combinados de satélites geoestacionarios con estimaciones generadas por una técnica de red neuronal artificial para convertir la información IR en tasas de lluvia. En su investigación, Chen et al. (2020) señala que PERSIANN-CDR proporciona estimaciones diarias de precipitación a una resolución espacial de 0.25° para la cobertura cuasi global de $60^\circ\text{N} - 60^\circ\text{S}$ desde 1983 hasta el presente, con el objetivo de producir un conjunto de datos coherente, a largo plazo, de alta resolución y casi global para hidrometeorología investigación. Los principales conjuntos de datos para la construcción del producto PERSIANN-CDR incluyen los datos infrarrojos satelitales en cuadrícula (GridSat-BI), los datos de radar de la Etapa IV de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) y los datos mensuales de precipitación GPCP a 2.5° . El producto PERSIANN-CDR se genera primero a partir del algoritmo PERSIANN-CDR utilizando los datos IR de GridSat-BI como los datos principales del satélite de entrada. En segundo lugar, los datos de radar de la etapa IV de NCEP se utilizan para crear los parámetros de regresión no lineal del modelo de red neuronal artificial. El producto mensual GPCP se utiliza para eliminar los sesgos de las estimaciones de la tasa de lluvia. Por último, los datos de precipitación de PERSIANN-CDR ajustados por 3 horas se acumulan a la escala diaria para producir el producto PERSIANN-CDR.

1.1.12. Evaluación de datos satelitales

Tan (2019) en su investigación señala que se puede realizar una comparación entre indicadores basados en puntos y basados en cuadrícula utilizando los enfoques de punto a cuadrícula o de cuadrícula a cuadrícula, la disponibilidad y distribución de los indicadores de precipitación seleccionados podrían ser una de las consideraciones para decidir qué enfoque utilizar. Por ejemplo, el enfoque de cuadrícula a cuadrícula es más adecuado para la región que contiene una red de pluviómetros de alta densidad y bien distribuidos. Esto se debe a que la interpolación de pluviómetros limitados puede causar una reducción de la variabilidad espacial del patrón de precipitación. Sin embargo, en muchos casos de análisis de precipitación extrema a largo plazo, solo se

dispone de indicadores de precipitación de buena calidad limitados. La mayoría de las cuadrículas contienen solo un medidor de precipitación, por lo que el enfoque de punto a cuadrícula es más apropiado en este estudio.

Huffman et al. (2007) señala que las estimaciones combinadas de microondas, IR calibrado por microondas y microondas-IR combinadas, etiquetadas como 3B40RT, 3B41RT y 3B42RT, respectivamente, están disponibles al público. El sistema de producto de investigación se ha desarrollado como el algoritmo de la versión 6 para el producto operativo TRBM 3B42, aunque ese producto solo proporciona el campo combinado final ajustado por el medidor. El producto TRMM-3B43 de la versión 6 se ha desarrollado como el producto de precipitación SG mensual posterior al tiempo real descrito anteriormente. Los datos de la Versión 6 están disponibles para enero de 1998 para el (demorado) presente en <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM-3B42/>, y se proporciona una capacidad interactiva de análisis y visualización en <http://disc2.nascom.nasa.gov/Giovanni/tovas>.

Chen et al. (2020) afirma que debido a que las estaciones de pluviómetros en el área de estudio son muy escasas, la interpolación espacial basada en observaciones de pluviómetros provocaría graves errores. A la vez da a conocer que todos los análisis estadísticos entre los datos de pluviómetros basados en puntos y las estimaciones de precipitación satelital basadas en cuadrículas se realizaron de forma directa mediante el método de vecino más cercano (NN). En el método NN, la estación de medición en la escala de la cuadrícula se extrajo y coincidió con el píxel del satélite más cercano, Además, se adoptó otra técnica de extracción de cuadrícula a punto [interpolación ponderada bilineal (BWI)] para comparar con el método NN para evaluar el desajuste espacial entre los datos del pluviómetro (basado en el punto) y las estimaciones de precipitación satelital (basado en la cuadrícula).

1.1.13. Modelo hidrológico SWAT

SWAT es utilizado en las cuencas hidrográficas/cuencas fluviales, teniendo en cuenta diferentes escenarios que se presenta para el modelamiento, el modelo se ha utilizado ampliamente para la simulación de la cantidad y calidad de agua en cuencas hidrográficas (Gassman et al., 2021).

Es un modelo determinista a escala de cuenca que opera en un paso de tiempo diario y en simulaciones de tiempo continuo utilizando topografía, propiedades del suelo, información LULC y datos climáticos como entradas principales. SWAT divide una cuenca en subcuencas, que a su vez se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU), combinaciones únicas de LULC, tipo de suelo y clase de pendiente. Los componentes hidrológicos simulados en SWAT incluyen evapotranspiración, escorrentía superficial, percolación y escorrentía lateral (escorrentía subsuperficial). Para simular la evapotranspiración (Escamilla et al., 2022).

SWAT subdivide la cuenca con base en el modelo digital del terreno (MDT) que representa las condiciones topográficas de declive y las formas del relieve, asociado a la información pedológica y de uso y cobertura de la tierra. Las subcuencas se dividen en unidades de respuesta hidrológica (URHs), manteniendo las variables espacialmente distribuidas con características homogéneas que representan la heterogeneidad de los factores que influyen en el comportamiento. Los procesos de fase terrestre se calculan en base a la ecuación de equilibrio y considerar las variables: lluvia, evapotranspiración, escorrentía superficie, infiltración, almacenamiento de suelo, flujo lateral, recarga de agua subterránea y flujo de agua subterránea. En la fase de agua, la escorrentía, así como los rendimientos de sedimentos y Los productos químicos agrícolas de todas las URH dentro de una subcuenca se suman y se ingresan en el rango principal de la subcuenca, donde se enrutan a través de la red de canales a la salida de la unidad hidrográfica (Santos et al., 2018).

Según Arnold et al. (1998) SWAT utiliza la ecuaciones del modelo matemático basado en el balance hídrico que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$(SW_t) = SW + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde:

SW_t : es la cantidad final de agua en el suelo (mm).

t : el tiempo (días).

R_i , la precipitación del día (mm).

Q_i , escorrentía superficial en el día (mm).

E_{Ti} , evapotranspiración en el día (mm).

P_i las filtraciones (mm) es decir, la cantidad de agua presente en la zona estudio del suelo en el día.

Q_{Ri} , el caudal de retorno (mm).

1.2. Antecedentes

Anjum et al. (2022) examinaron la incertidumbre en las estimaciones de precipitaciones diarias y mensuales de los productos de precipitación en la región subtropical semiárida, provincia de Punjab en Pakistán, donde se concordaron mejor con las observaciones mensuales en tierra que con los registros diarios, sustentan que CHIRPS-2.0, SM2RAIN-ASCAT fueron mejores que PERSIANN-CCS y PERSIANN-CDR.

Por su parte Sutton et al. (2022) compararon las precipitaciones de una red hidrológica y los datos de los satélites TRMM-3B42 TMPA de la NASA y PERSIANN-CDR a escalas diarias, semanales y mensuales durante veinticinco tifones en el Pacífico Norte Occidental demostrando que las precipitaciones de satélite PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 TMPA explicaron aproximadamente el 50 % de la variación en la precipitación acumulada semanal y aproximadamente el 72 % de la variación en la precipitación acumulada mensual, para entender a los sensores remotos satelitales que ofrecen precipitaciones se compararon con las estaciones que acumulan información disponible.

Valdés-Pineda et al. (2021) en la cuenca superior del río Zambezi en África, se realizaron los estudios con el objetivo de combinar modelos hidrológicos con productos de precipitación satelital para generar caudales pronosticados, utiliza el enfoque Variational Ensemble Forecasting (VEF), en donde se calibrara y validara un sistema de pronóstico hidrológico utilizando datos de lluvia en tiempo real de tres Productos de Precipitación Satelital o SPP (The real-time TRMM-3B42 Multisatellite Precipitation Analysis TMPA-RT, NOAA CPC Morphing Technique CMORPH, y la Estimación de Precipitación a partir de datos de Sensores Remotos usando Redes Neuronales Artificiales, PERSIANN), como resultado final se obtuvo las correcciones de lluvia exitosas pueden tener un impacto significativo en los próximos pasos relacionados con la calibración del modelo.

Keys & Baade (2019) el estudio comprende la variabilidad espacial de las precipitaciones en Australia. Para obtener lluvia de resolución espacial fina se emplea la interpolación

basados en la combinación y correlación de lluvia-escala espacial-umbral de correlación para representar la variabilidad espacial de la lluvia. El método aplica a los datos de precipitaciones mensuales con una resolución de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de latitud/longitud en toda Australia, disponibles en la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (versión TRMM-3B43). Los resultados dan a conocer que en los climas tropicales generalmente tienen mayores correlaciones espaciales de lluvia en comparación con los climas templados, oceánicos y continentales.

Zhong et al. (2019) el monitoreo de sequías a través de productos de estimación de precipitación en China continental. A través de estos productos utilizaron los índices de sequía, índices de precipitación estandarizada y índice de sequía de Palmer, el propósito del estudio es el monitoreo de la sequía utilizando las precipitaciones por satélite que se encuentran agrupados en tres QPE. Demostrando así que funcionaron satisfactoriamente en la parte oriental de China, sin embargo, al oeste de China no se pudieron determinar claramente debido al ancho y escasa información. Dentro lo que se puede analizar es que a largo plazo funcionan satisfactoriamente los productos PERSIANN-CDR y CHIRPS también demostraron que a corto plazo resultan ser buenos por lo que se considera un potencial para el monitoreo de sequías.

Lakew et al. (2017) da a conocer que, en la cuenca del Nilo Azul, en la parte etíope de las tierras altas de África Oriental, evalúa tres productos de precipitación de los satélites CMORPH ajustado por calibre (corregido), (TRMM-3B42) TMPA 3B42v7 y productos de reanálisis ECMWF, calibrado y utilizado en el modelo hidrológico distribuido enrutamiento acoplado y almacenamiento en exceso (CREST). Los resultados de los productos de precipitación muestran un mejor desempeño en la estimación de la escorrentía cuando se calibran de manera independiente de esta manera pueden proporcionar suficiente información para la gestión de los recursos hídricos.

Katiraie-Boroujerdy et al. (2017) indica que la evaluación de las precipitaciones estimaciones por el método sombrero de tres picos generalizado (GTCH) a escalas de tiempo mensual y diarias utilizando información de datos climáticos satelital (PERSIANN-CDR) y el algoritmo 3B42 de la Misión de medición de lluvia tropical, versión 7 (TRMM-3B42V7), relacionados señal/ruido más alta (SNR), la información ingresa al GTCH es de forma independiente cumpliendo los requisitos de entrada, para la comprobación del desempeño a escala diaria se compararon con pluviómetros in situ

recopilados Ambos productos satelitales muestran coeficientes de correlación más altos y RMSE más bajos para la media anual de períodos secos consecutivos que para los períodos húmedos. Los resultados muestran que TRMM-3B42V7 puede capturar la media anual de los índices absolutos (el número de días húmedos en los que la precipitación diaria > 10 mm, 20 mm) mejor que PERSIANN-CDR.

Sliwi (2022) menciona que los modelos de elevación digital (DEM) son datos de entrada para el modelamiento de cuencas, se pueden determinar a través de estos los cursos de agua y los límites de la cuenca, los DEM cuenta con alta resolución espacial a la vez se encuentran con una amplia gama de tamaños de píxeles. Para la determinación de dichos elementos se realizó en la interfaz del modelo SWAT, el cual es ampliamente utilizado para el modelado de cuencas agrícolas. Determina los cursos de agua en función de los DEM y el valor umbral del área drenada donde se va a producir un curso de agua. Los valores posteriores de resolución del DEM investigado se obtuvieron mediante un aumento a la mitad de los valores de resolución anteriores, comenzando con la resolución original y terminando con un valor de resolución similar al centuplicado del original. Este valor se seleccionó experimentalmente en la herramienta de remuestreo con los métodos bilineal y cúbico en ArcGIS tampoco está dedicada a cambiar significativamente la resolución. No hay una diferencia significativa en el resultado, ya sea que tomemos 1 píxel (NN), 4 píxeles adyacentes (bilineal), o incluso 16 píxeles (cúbicos) para el cálculo en comparación con la otra opción, de tomar más de 2480 píxeles distantes. Por lo tanto, en este trabajo se utilizaron métodos de muestreo estadístico.

Fujita et al. (2022) indica que la razón del estudio es identificar los cambios del flujo fluvial en la cuenca del Río Ivai que se encuentra en el sur de Brasil, en si investigación evalúa los niveles actuales y disminución del flujo fluvial, para el estudio de este caso ha utilizado la herramienta de evaluación del agua y suelo para simular la descarga mensual en la cuenca. La evaluación se realizó por la funcionalidad, limitaciones y las curvas de duración en términos de porcentaje, después de las iteraciones y calibración de la descarga mensual rebelo que son muy buenos resultados.

Dekongmen et al. (2022) da a conocer que en la cuenca hidrográfica Afram Plains ubicada en la parte inferior de la cuenca Volta en la región oriental Ghana, respecto al estudio se tiene como objetivo estimar la recarga utilizando la herramienta de evaluación de suelos y agua (SWAT) y el enfoque del SIG. Los resultados mostraron que alrededor del 1,65 %

(19,3 mm) de la precipitación media anual simulada SWAT (1176,9 mm) se convierte en recarga de agua subterránea en la cuenca.

Fu et al. (2022) indica que los parámetros meteorológicos e hidrológicos son fundamentales para determinar el recurso hídrico disponible, para la mejora de estos parámetros se hace el uso del método de reducción de escala estadística, utilizando con el modelo de red neuronal de regresión generalizada, modelado en la herramienta de evaluación de suelo y agua (SAWT). La evaluación se realizó en Huangshui de la meseta de Qinghai-Tíbet bajo escenarios de cambios climáticos. Los resultados indicaron que la precipitación tendría un gran aumento durante la estación húmeda de mayo a septiembre, y los flujos y los recursos hídricos disponibles disminuirían con el aumento de las emisiones de carbono bajo diferentes vías de concentración representativas.

Gunathilake et al. (2021) indica que la precisión de los productos de precipitación basados en satélites depende de muchos factores, incluida la climatología de la cuenca, la topografía de la cuenca y el mecanismo de precipitación. En consecuencia, en su estudio examinó la eficiencia de nueve de productos de precipitación (3B42, 3B42-RT, PERSIANN-CDR, PERSIANN-CCS, CHIRPS, CMORPH, IMERG y MSWEP) y tres GbGPP (incluidos APHRODITE_V1801, APHRODITE_V1901 y GPCC) en la cuenca hidrográfica de Huai Bang Sai ubicado al noreste de Tailandia, simularon el flujo de la cuenca a través SWAT, la capacidad de simulación de caudales del modelo hidrológico para diferentes productos de precipitación se comparó con los registros de caudales observados utilizando el mismo conjunto de parámetros calibrados utilizados para un escenario simulado, los productos MSWEP y CHIRPS han funcionado bastante bien durante la calibración; sin embargo, mostraron un rendimiento reducido para la validación. Por lo tanto, los resultados sugieren que los datos precisos de precipitación son el principal factor determinante en el desempeño de los modelos de caudales.

Para Liu et al. (2017) la limitada información de precipitaciones observadas debido a que la zona es hostil en la meseta tibetana, se plantean el uso de las precipitaciones satelitales para tener una mejor cobertura en cuanto a productos de lluvia, para el uso del modelo hidrológico como entrada se tiene datos climáticos (PERSIANN-CDR -CDR) para estimar el flujo de corrientes en las cuencas en la parte superior de Yellow y las cuencas de los ríos Yangtze en la meseta tibetana. Obteniendo como resultado que los datos

climáticos PERSIANN-CDR están cerca a los datos observados tienen un buen desempeño similar en la simulación del flujo de la corriente.

Yu et al. (2011) manifiesta que en las cuencas del río Manas ubicado al noroeste de China tiene una baja densidad de estaciones de precipitación, lo que dificulta el modelado y la predicción de caudal. Por lo que realizó la combinación de datos pluviométricos y los datos de la misión de medición de lluvias tropicales (TRMM), la precipitación especializada se ingresó a la herramienta de evaluación de suelos de agua (SWAT), este es un modelo semidistribuido que se dio como resultados de este modelo con las precipitaciones especializadas combinados con datos pluviométricos proporciona una fuente de datos.

Tobin & Bennett (2009) utiliza los datos de los pluviómetros terrestres como las precipitaciones satelitales en la cuenca del río medio nueces y el río grande al sur de Texas y al norte de México, simuló el modelo hidrológico distribuido para comparar el rendimiento de los pluviómetros y los datos de la misión de medición de lluvias tropicales (TRMM-3B42) (versión 6), para evaluar el modelado hidrológico elige la herramienta de evaluación de suelos y agua (SWAT), realizó ajustes menores a los parámetros del modelo obteniendo datos más acorde a la realidad en función a los resultados, demostrando las simulaciones con éxito a la utilidad de las precipitaciones estimadas por satélite (TRMM-2B42) para respaldar el modelo hidrológico con SWAT.

En el modelado hidrológico Umugwaneza et al. (2022) indica que el análisis de sensibilidad permite identificar los parámetros relevantes que afectarán la simulación del caudal, las estimaciones iniciales de SWAT relacionado con la escorrentía se deben ajustar a los datos de flujo observados a escala diaria, también recomienda usar el enfoque de muestra dividida, dividiendo los datos de medición de descarga en dos conjuntos de datos: dos tercios para calibración y el otro para validación. Independientemente de la escasez de datos, la investigación da una idea de cómo la integración de MCDM en RS y GIS integrado con el modelo SWAT es una solución efectiva para evaluar el potencial de escorrentía, el rendimiento.

Pulighe et al. (2021) la versión reestructurada del modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT+) se utilizó para simular los componentes hidrológicos en la cuenca hidrográfica de Sulcis en la parte suroeste de la región de Cerdeña (Italia), utilizando dos modelos climáticos regionales RCP4.5 y RCP8.5 que son datos de alta resolución que han

sido descargados para calibrar y validar, como resultado se tiene el aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación este efecto causa el aumento de evapotranspiración en ambos escenarios, como resultado de este análisis se tendrá una disminución de la producción del agua.

Ang & Oeurng (2018) en relación con la simulación de la cuenca del río Stung Pursat, una subcuenca no aforada al sur del lago Tonle Sap. Cuenca Sap en Camboyade. El flujo de la corriente a través de la calibración y la validación diaria como mensual con el modelo de la Herramienta de evaluación del suelo y el agua (SWAT), utilizando datos observados de caudal diario. La simulación diaria produjo los resultados con una eficiencia de caudal de las series temporales mensuales mejoraron y fueron aceptables respectivamente. El modelo SWAT debe usarse para simular el caudal mensual en una cuenca sin medir como la cuenca de Stung Pursat debido a la escasez de datos y la incertidumbre.

Narsimlu et al. (2015) ha utilizado el modelo semidistribuido SWAT-CUP (SWAT-Calibration and Uncertainty Programs) para la calibración del modelo, análisis de sensibilidad e incertidumbre. Los resultados de las simulaciones SWAT indican una rigurosidad en la calibración y validación, la bondad de ajuste resultó el desempeño satisfactorio. Los resultados serían útiles para la comunidad hidrológica, los administradores de recursos hídricos involucrados en la gestión agrícola del agua y la conservación del suelo, así como para aquellos involucrados en la mitigación de peligros naturales como sequías e inundaciones.

CAPÍTULO II.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

El propósito del presente estudio, es el uso de estimaciones de precipitación proporcionados por sensores remotos como una alternativa, este uso es cada vez más frecuente debido a la limitación de datos que se puede tener en las estaciones hidrológicas, la mayor parte de estaciones hidrológicas se encuentran dispersos como consecuencia se tiene grandes áreas deficientes de cubrimiento de información meteorológico, en algunos casos la información meteorológica puede resultar insuficiente debido a los errores de lectura, lugares inaccesibles y la falta de recursos. esto limita la disponibilidad de series continuas de precipitación que se requiere para realizar estudios y pronósticos de balances hídricos, por lo que es necesario realiza el análisis de la relación que existe entre la información recopilada de los pluviómetros y los productos satelitales TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR. Los datos de los productos satelitales son los puntos donde se ubican las estaciones hidrológicas, la información corresponde a una escala temporal diaria. Las precipitaciones obtenidas son los datos de entrada para realizar el modelamiento hidrológico en la Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua (SWAT), partiendo del hecho de que, si al modelar la cuenca hidrográfica con los datos de entrada con las diferentes precipitaciones, con la información de las precipitaciones se realiza el modelamiento hidrológico para ver los resultados de los caudales simulados son diferentes o iguales a los caudales observados, El propósito de la presente investigación, se enfocará en analizar la relación existente entre las precipitaciones observadas y de datos de precipitación satelital TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR.

2.2. Enunciados del problema

Las estimaciones de precipitación seleccionado en la cuenca Ramis, indicara la fortaleza o la dificultad asociada a las estimaciones de precipitación por satélite. Para lo cual se hace las siguientes interrogantes:

2.2.1. Interrogante general

¿Pueden las estimaciones de precipitación basada en satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR representar adecuadamente los caudales en la cuenca del río Ramis Perú?

2.2.2. Interrogantes específicos

¿Existe relación entre los datos de precipitación observada y las estimadas por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR?

¿Cuál es el rendimiento de los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN al ser utilizados como datos de entrada en la modelación hidrológica?

2.3. Justificación

El propósito de la presente investigación es determinar una nueva fuente de información en cuanto se refiere a precipitaciones hidrológicas, entonces se plantea el uso de información entre las que se encuentra las precipitaciones por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR. Por medio de esta técnica, actualmente se puede obtener información para el estudio de balances hídricos sin necesidad de instalar equipos físicos in situ, esta técnica de recolección y estimación de datos, las ventajas que nos brinda estos productos son la captura de datos con una gran resolución temporal y espacial que abarcan grandes extensiones de territorio a través de la percepción remota, lo que indica que se puede contar con información constante que permita tener registros históricos y actuales, además se puede obtener información de territorios inaccesibles y sitios sin observación. Esto podría ser de utilidad incluso para cuencas no instrumentadas.

Los resultados de esta investigación, permitirán a los usuarios contar con información meteorológica, obtenidos desde una fuente de datos gratuitos y disponibles libremente para todo el mundo, lo cual facilita la aplicación para la determinación temporal diaria,

que posee aproximadamente 17 años de observaciones, que nos permitirán a estimar caudales. Esto ayudara a enriquecer las investigaciones relacionados con los recursos hídricos, en territorios donde la información es escasa o nula en cuanto se refiere a las precipitaciones. Asimismo, para resolver este problema se optaría por instalar la cantidad suficiente de estaciones que cubran el territorio, no se contaría con la información histórica necesaria para contribuir al diseño de los recursos hídricos no todas las estaciones meteorológicas tienen la información pluviométrica necesaria disponible en la región, aunque en la mayoría de ellas se puede solicitar a cierto precio al SENAMHI.

La técnica de medir las precipitaciones y caudales ha evolucionado a través del tiempo, el uso de las imágenes satelitales es una de las técnicas que proporcionar información valiosa para representar modelos hidrológicos, en territorios donde la información de precipitación observada en tierra es escasa, un buen pronóstico se formula en base a la información fiable que intervienen en el análisis las mediciones hidrológicas y meteorológicas caracterizadas en una cuenca hidrológica, una baja capacidad predictiva está limitada a una baja densidad de estaciones de observación, personal disponible y el costo elevado de transferencia de datos. La salida a este problema se plantea la propuesta de utilizar los satélites meteorológicos, que son capaces de proporcionar información periódica de cada punto de la tierra de esta manera proporciona información con una rápida captura de datos.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general

Realizar el modelamiento hidrológico mediante el uso de precipitaciones obtenidas por satélite en la cuenca del río Ramis Perú.

2.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR con mediciones pluviométricas.
- Evaluar los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR como entrada en la modelación hidrológica.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

Las estimaciones de precipitación basadas en satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR permiten representar adecuadamente los caudales en la cuenca del río Ramis Perú

2.5.2. Hipótesis específica

- Existe relación entre los datos de precipitación observada y las estimadas por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR.
- Los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN al ser utilizados como datos de entrada en la modelación hidrológica, permiten representar adecuadamente los caudales.

CAPÍTULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

La cuenca del río Ramis (CRR) (Figura 4), está ubicada al sur de Perú en el departamento de Puno. La CRR se extiende desde el extremo sur latitud $14^{\circ}03'26.6''$ - $15^{\circ}27'33.7''$ y longitud oeste $69^{\circ}25'26.4''$ - $71^{\circ}07'04.7''$, cubriendo una extensión de 14596.284 km^2 , La altitud de la CRR varía entre 3797 a 5743 m.s.n.m.

Hidrográficamente la CRR se ubica en la región hidrográfica del Titicaca, sistema hídrico Titicaca, Desaguadero, Poopo y Salar (TDPS). El límite de la cuenca desde aguas abajo inicia en la estación hidrométrica puente Ramis y su ubicación geográfica se encuentra en la latitud sur $15^{\circ}15'19.11''$ y longitud oeste $69^{\circ}52'25.63''$. En consecuencia, su recorrido hacia aguas abajo de la estación hidrométrica, se une con el río Huancané y en seguida desemboca al lago Titicaca.

La CRR presenta un clima variable en función a estaciones, la estación varía de noviembre a marzo es húmedo, de junio a agosto se tiene una estación seca, y dos periodos de transición de septiembre a octubre y abril a mayo, entre las épocas más lluviosas de régimen anual en la cuenca varía de 550 a 925 mm. Los valores más altos se dan en la cabecera de la cuenca, las temperaturas altas durante el año son durante el verano y enfriamiento atmosférico es durante la época de otoño e invierno y las medias altas en primavera.

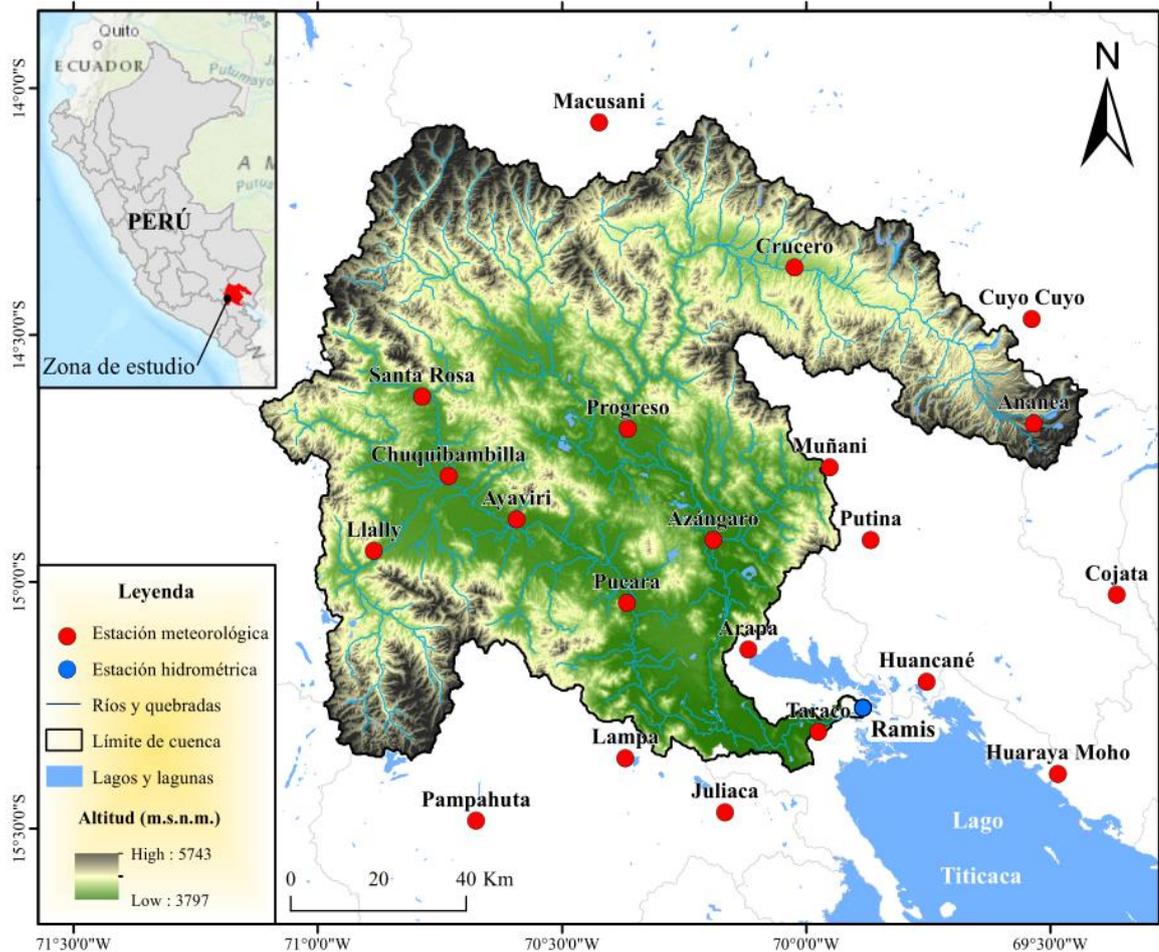


Figura 4. Localización geográfica de la cuenca Ramis.

3.2. Población

La variable que se analiza en la investigación es la precipitación a escala diaria que proviene de tres fuentes información, la primera proviene de la recopilación y almacenamiento de datos de las 21 estaciones meteorológicas que está a cargo del SENAMHI (Ananea, Arapa, Ayaviri, Azángaro, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Cuyo Cuyo, Huancané, Huaraya Moho, Juliaca, Lampa, Llally, Macusani, Muñani, Pampahuta, Progreso, Pucara, Putina, Santa Rosa, Taraco), los otros dos datos consiste en fuentes que consiste en datos de los sensores satelitales TRMM-3B42 que son satélites meteorológicos de órbita polar que estiman lluvia a partir de sensores que escanea la radiancia visible e infrarrojo de onda media (VIRS), sensores de microondas pasivo (TMI), sensor de imagen relámpagos (LIS) y un sistema de energía radiante de la superficie terrestre que emplea una base de datos de imágenes de nubes de altísima resolución y PERSIANN-CDR son satélites de orbita geostacionario/geosincrónicos

que estima la lluvia a partir de información de textura de nube con información de imágenes infrarrojos de onda larga obtenidas de imágenes de múltiples, ambos se realizara el análisis en base a la disponibilidad y calidad de dicha información.

3.3. Muestra

3.3.1. Topografía, uso de la tierra y clase de suelo

3.3.1.1. Topografía

Se utilizó el modelo digital de elevación (DEM) de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM) (Figura 5a y Tabla 1), satélite de observación de la tierra de la misión NASA y otros organismos como la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial. El DEM fue obtenido de Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Los nuevos datos se han publicado con un muestreo de 1 segundo de arco (~30 metros), que revela la resolución completa de las mediciones originales (Roa Lobo & Kamp, 2008). La resolución espacial del DEM es uno de los factores de la capa base más cruciales para modelar y se debe tener en cuenta su estudio para evaluar la influencia de la resolución espacial (Avand et al., 2022). Los DEM con las mismas resoluciones también fueron utilizados en las investigaciones de (Meza, 2020), (Monteiro et al., 2018) y Siev et al. (2016) con buenos resultados.

3.3.1.2. Uso de la tierra

El espectrorradiométrico de imágenes de resolución moderada (MODIS) de la NASA Terra Snow Cover proporciona albedo diario a una resolución de 500 metros (Sproles et al., 2020). Los datos de cobertura terrestre o uso de la tierra (Figura 5b y Tabla 1) fueron obtenidos de MCD12Q1, un producto de nivel 3 de los conjuntos de datos de cobertura terrestre de MODIS. Este producto se deriva del resultado de MODIS publicado por primera vez por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos a fines de 2008, con datos de observación anuales procesados de los satélites Terra y Aqua aplicados para representar los tipos de cobertura terrestre (Liang et al., 2015). Los datos se encuentran disponibles en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

3.3.1.3. Clase de suelo

Los datos de clase de suelo (Figura 5c y Tabla 1) fueron utilizados del mapa digital de suelos del mundo (DSMW) que incluye las propiedades del suelo y corresponden a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). El conjunto de datos, contiene características relacionados de la textura del suelo, obtenido de forma gratuita de: (<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show%3Fid=14116>).

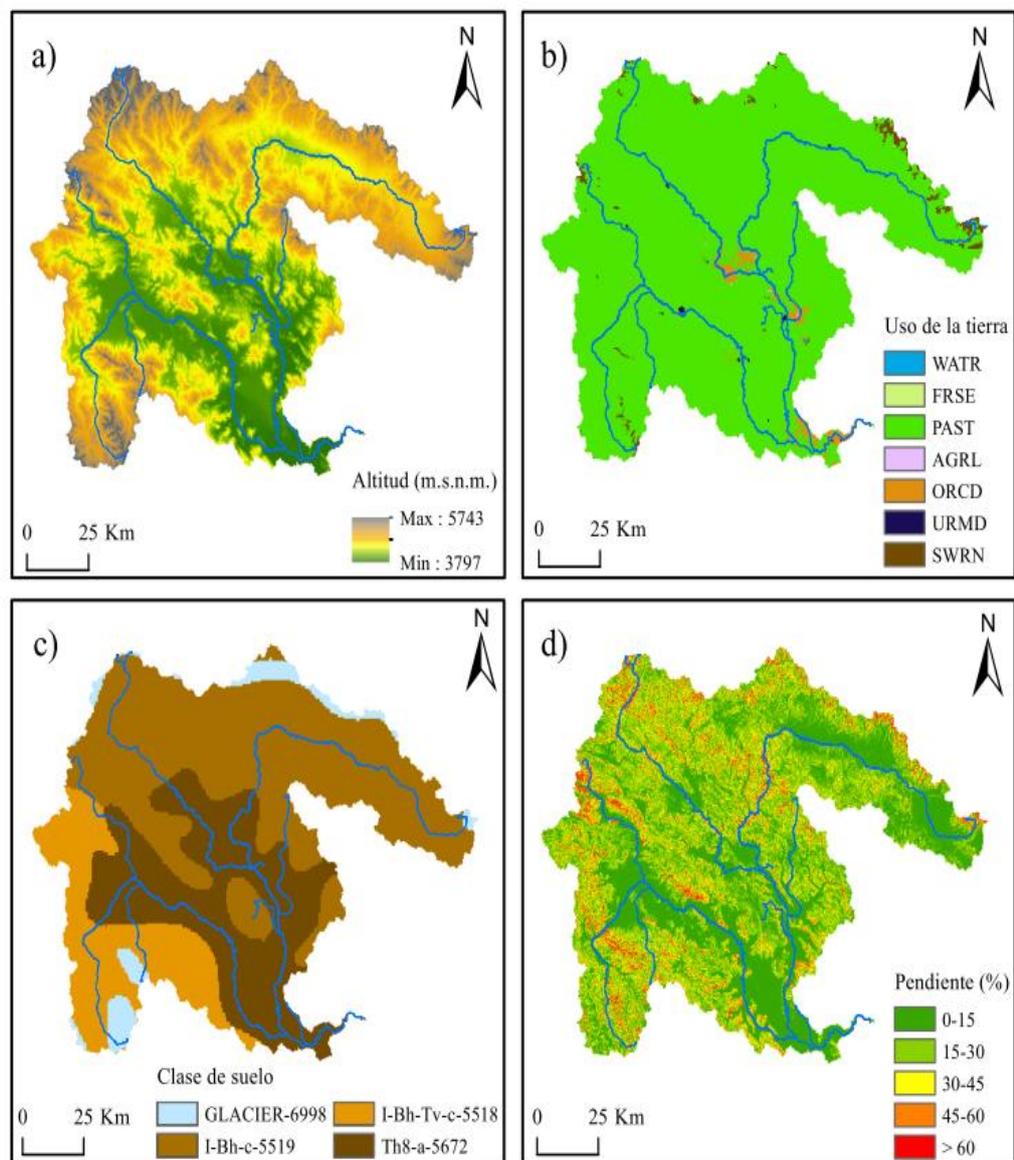


Figura 5. Características de a) altitud, b) uso de la tierra, c) clase de suelo y d) pendiente.

Tabla 1

Características de los datos utilizados.

| Tipo de datos | Descripción de datos | Escala | Fuente de datos |
|--|--|-------------|---|
| Mapa topográfico | DEM | 30 metros | https://earthexplorer.usgs.gov |
| Mapa de uso de la tierra/cobertura de tierra | Uso de suelo/Clasificación de la cobertura del suelo | 500 metros | https://earthexplorer.usgs.gov/ |
| Mapa de suelo | Tipo de suelo | 1:5 000.000 | https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/spa/catalog.search#/search?resultType=details&sortBy=relevance&keyword=DSMW&from=1&to=50 |
| Meteorología | Precipitación diaria, Temperatura mínima y máxima | 2003 -2019 | SENAMHI |
| Meteorología | Precipitación diaria PERSIANN-CDR | 2003 -2019 | https://earthengine.google.com/platform/ |
| Meteorología | Precipitación diaria TRMM-3B42 | 2003 -2019 | https://earthengine.google.com/platform/ |
| Datos hidrológicos | Caudales de la estación puente Ramis | 2003-2019 | SENAMHI |

3.3.1. Mediciones hidrometeorológicas

La muestra corresponde al registro de precipitaciones y temperaturas diarias de 17 años (enero del 2003 a diciembre del 2019) de las estaciones (Ananea, Arapa, Ayaviri, Azángaro, Chuquibambilla, Cojata, Crucero, Cuyo Cuyo, Huancane, Huaraya Moho, Juliaca, Lampa, Llally, Macusani, Muñani, Pampahuta, Progreso, Pucara, Putina, Santa Rosa y Taraco) que se ubican dentro y alrededor de la CRR, las estaciones meteorológicas son de tipo climatológica ordinaria (CO) y son de propiedad del SENAMHI. El mismo periodo de datos fue considerado para los caudales medios diarios de la estación hidrométrica Ramis (Tabla 2).

Tabla 2

Características de las estaciones hidrometeorológicas.

| N° | Nombre | Código | Latitud (°) | Longitud (°) | Altitud (msnm) | Estación |
|----|----------------|--------|----------------|-----------------|-------------------|---------------|
| 1 | Ananea | 114050 | -14.67872 | -69.53453 | 4653 | Meteorológica |
| 2 | Arapa | 115035 | -15.13653 | -70.1185 | 3892 | Meteorológica |
| 3 | Ayaviri | 114038 | -14.87294 | -70.59317 | 3921 | Meteorológica |
| 4 | Azángaro | 114041 | -14.91464 | -70.19103 | 3840 | Meteorológica |
| 5 | Chuquibambilla | 114035 | -14.78506 | -70.73264 | 3899 | Meteorológica |
| 6 | Cojata | 115053 | -15.02569 | -69.36397 | 4325 | Meteorológica |
| 7 | Crucero | 114058 | -14.36261 | -70.02381 | 4131 | Meteorológica |
| 8 | Cuyo Cuyo | 114096 | -14.46669 | -69.53856 | 3508 | Meteorológica |
| 9 | Huancané | 115037 | -15.20178 | -69.75383 | 3860 | Meteorológica |
| 10 | Huaraya Moho | 115038 | -15.38856 | -69.48456 | 3818 | Meteorológica |
| 11 | Juliaca | 115138 | -15.46667 | -70.16667 | 3828 | Meteorológica |
| 12 | Lampa | 100081 | -15.35694 | -70.37083 | 3929 | Meteorológica |
| 13 | Llally | 114034 | -14.93683 | -70.88622 | 4211 | Meteorológica |
| 14 | Macusani | 114039 | -14.06847 | -70.42406 | 4350 | Meteorológica |
| 15 | Muñani | 114042 | -14.76722 | -69.95208 | 3923 | Meteorológica |
| 16 | Pampahuta | 115027 | -15.48381 | -70.67606 | 4292 | Meteorológica |
| 17 | Progreso | 114040 | -14.68947 | -70.36578 | 3952 | Meteorológica |
| 18 | Pucara | 115046 | -15.04246 | -70.36718 | 3869 | Meteorológica |
| 19 | Putina | 114093 | -14.91489 | -69.86803 | 3853 | Meteorológica |
| 20 | Santa Rosa | 114047 | -14.62403 | -70.78681 | 3944 | Meteorológica |
| 21 | Taraco | 115047 | -15.30372 | -69.97531 | 3817 | Meteorológica |
| 22 | Ramis | | | | | Hidrométrica |

3.3.2. Estimaciones de precipitación basadas en satélite

3.3.2.1. Producto de precipitación PERSIANN-CDR

El algoritmo fue desarrollado por el Centro de Hidrometeorología y Detección Remota de la Universidad de California, Irvine (UC-IRVINE/CHRS) utilizando los datos IR de Gridded Satellite (GridSat-B1) que se derivan de la fusión de datos IR ISCCP B1, junto con GPCP versión 2.2. El conjunto de datos PERSIANN-CDR fue obtenido de la plataforma Google Earth Engine (GEE) (<https://earthengine.google.com/platform/>). Se encuentra disponible en formato geo-tiff de fácil análisis y la interpretación práctica con valores en cada píxel que representa la cantidad de precipitación diaria en mm/día (Wiwoho et al., 2021). Los datos se obtuvieron de forma gratuita para el periodo 2003 – 2019 para cada punto de estación meteorológica. Las características principales de disponibilidad de datos PERSIANN-CDR se puede consultar en la Tabla 3.

3.3.2.2. Producto de precipitación TRMM-3B42.

El producto TRMM-3B42 basado en el análisis de precipitación multisatélite (TMPA) de TRMM-3B42 proporciona una medición en tiempo real de los datos de lluvia utilizando un sensor de radar de precipitación (PR). El sensor PR ha operado a 13,8 GHz desde 1997. Este producto acumula datos de lluvia diaria (mm/día) y se derivó del producto TRMM-3B42 de 3 horas originalmente disponible (Tripathi et al., 2019). El conjunto de datos TRMM-3B42 fue obtenido de la plataforma GEE para el periodo 2003 - 2019. Las características principales de disponibilidad de datos TRMM-3B42 se puede consultar en la Tabla 3.

Tabla 3

Resumen de las principales características de los productos PERSIANN-CDR y TRMM-3B42.

| Producto | Resolución espacial | Cobertura espacial | Resolución temporal | Periodo | Referencia |
|-----------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|
| PERSIANN-CDR | 0.25° x 0.25° | 60°S – 60°N | diario | 2000 a la actualidad | (Nguyen et al., 2018) |
| TRMM-3B42 | 0.25° x 0.25° | 50°S–50°N | diario | 1997 - 2019 | (Arijaje et al., 2022) |

3.4. Método de investigación

Se ha empleado una investigación cuantitativa, no experimental debido a que la manipulación de datos no se sometió a pruebas que modifiquen su consistencia porque son fenómenos que han sucedido a través del tiempo.

3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

3.5.1. Evaluación de los datos de precipitación estimada por los satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR con mediciones pluviométricas

Antes de realizar el proceso de evaluación de datos de precipitación estimada por satélite, se verificó la homogeneidad de los datos mediante el uso del paquete Climatol. La homogenización se define como un proceso que elimina las perturbaciones de los registros de datos crudos que no ha tenido el suficiente cuidado al momento de ser registro, que no tenga alguna desviación se refiere en corregir los cambios del comportamiento de la serie debido a factores externos no climáticos como es la ausencia datos, cuando esto se presenta se hace ajustes con estimaciones estadísticas que estén lo más cerca posible de los parámetros observados.

Climatol realiza un proceso de control de calidad de datos climatológicos y corrige los cambios del comportamiento de una serie de factores externos no climáticos, valores sospechosos, comportamientos o tendencias sospechosas, las causas que puedan originar los valores sospechosos se puede considerar errores en la medición y problemas con los instrumentos de medición. Es un paquete disponible para R y trabaja

con datos diarios y se puede aplicar a diferentes variables climáticas con una tolerancia de datos faltantes muy alta (Pino-Vargas et al., 2022). dentro de su análisis estadístico se encuentra la aplicación Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) que comprueba la homogeneidad de los datos. La idea de esta prueba es encontrar un punto de ruptura dentro de una serie, seguidamente busca la existencia de dos o más saltos de la media de una muestra de tamaño similar que enmascara los resultados, en una primera etapa se minimiza el problema aplicando el SNTH sobre ventanas temporales, seguidamente para las series completas se aplica SNHT en este punto la prueba tiene más poder de detección, finalmente, se rellena los datos ausentes en todas las series y sub-series homogéneas. Aunque la metodología subyacente del programa es muy simple, su operación se complica a través de una serie de procesos iterativos anidados (Gujarro, 2018). Climatol utiliza el método de Paulhus & Kohler, (1952) para completar los datos diarios mediante promedios de valores normalizados mediante división por sus respectivos valores medios. Asimismo, se puede obtener restando las medias o la estandarización completa denominado m_x y s_x , la media y desviación típica de una serie X, las alternativas para la normalización son las siguientes:

Restar la media

$$r = X - m_x$$

Dividir por la media

$$x = X/m_x$$

Estandarizar

$$x = (X - m_x)/s_x$$

Climatol analiza los datos con los parámetros disponibles en cada serie. Vuelve a calcular con las series rellenas que dará lugar a nuevas medidas y desviaciones típicas provisionales, repitiendo el proceso hasta redondear la precisión inicial de los datos.

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j}$$

$$w_j = 1/(1 + \frac{d_j^2}{h^2})$$

$$h = 100 \text{ km}$$

En consecuencia, los datos de EPBS PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 fueron extraídos por puntos de estaciones meteorológicas y comparamos con las mediciones de pluviómetros. Para la extracción de los datos se utilizó la plataforma Google Earth Engine <https://code.earthengine.google.com/> utilizando el código del anexo 1. Para su evaluación se utilizaron diagramas de dispersión e indicadores de rendimiento estadístico más utilizados, a saber, el coeficiente de correlación (r), la raíz del error medio cuadrático (RMSE), la eficiencia de Nash (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y el índice de concordancia (d).

a) Coeficiente de correlación (r)

Es un indicador de eficiencia y mide el nivel de relación entre variables (Mills, 2001). El coeficiente de correlación r se refiere a la concordancia entre los datos simulados y los datos observados y oscila entre -1 y $+1$. El valor ± 1 indica una correlación perfecta (Saber & Yilmaz, 2018).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$$

Donde S son los valores simulados; O los valores observados; \bar{S} y \bar{O} denotan los valores medios de S y O respectivamente; n indica el número de pares de datos.

b) Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

Según Torres-bejarano et al., (2016) para determinar el error de las predicciones se debe cuantifica en términos de unidades la variable, este error se determina mediante RMSE, el cual se expresa:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (S_i - O_i)^2}$$

c) Eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE)

NSE varía de $-\infty$ a 1. Cuando el rendimiento del modelo no es aceptable el NSE da como resultado valores negativos. Cuando la eficiencia es igual a 1 indica una coincidencia perfecta entre los valores simulados con los datos observados (Bal et al., 2021). Según los criterios de Moriasi et al., (2015) para evaluar el desempeño estadístico de modelos se puede considerar “muy bueno” cuando $NSE > 0.80$, “bueno” cuando $0.70 < NSE \leq 0.80$, “satisfactorio” cuando $0.50 < NSE \leq 0.70$ y “no satisfactorio” $NSE \leq 0.50$.

$$ENS = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{S})^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$$

d) Sesgo porcentual (PBIAS)

PBIAS indica la tendencia promedio de los datos simulados basados en datos observados más grandes o pequeños, el mejor valor es 0; los valores negativos (positivos) indican una subestimación (sobreestimación) (Vu et al., 2018). Según los criterios de Moriasi et al., (2015), para evaluar el desempeño estadístico de modelos se puede considerar “muy bueno” cuando $PBIAS < \pm 5$, “bueno” cuando $\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$, “satisfactorio” cuando $\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$ y “no satisfactorio” cuando $PBIAS \geq \pm 15$.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100$$

e) Índice de concordancia (d)

Es una medida estandarizada del grado de error de predicción del modelo que varía entre 0 y 1 (Timsina et al., 2007). Representa la relación entre el error cuadrático medio y el error potencial de los datos simulados y observado (K. Lou Liu et al., 2015).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - O| + |O_i - O|)^2} \right]$$

3.5.2. Evaluación de los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR como entrada en la modelación hidrológica

Aquí, utilizamos productos de precipitaciones diarias PERSIANN-CDR, TRMM 3B42, mediciones de pluviómetro, incluida la temperatura máxima, temperatura mínima del aire como entradas al modelo hidrológico SWAT.

ArcSWAT es una extensión e interfaz de ArcGIS (disponible en: <https://swat.tamu.edu/>), es un modelo hidrológico conceptual y semidistribuido, que simula datos de tiempo diario, las variables de entrada que utiliza el modelo SWAT son: 1) modelo de elevación digital (DEM) que dividirá en cuencas y URH, 2) mapa de uso de tierra y 3) mapa de suelo (Vu et al., 2018). Uno de los primeros pasos para la modelación hidrológica con SWAT es delimitar la cuenca con la herramienta ArcSWAT los datos de entrada para el proceso son: DEM y el punto de aforo de la estación hidrométrica. Luego se divide la cuenca en unidades de respuesta hidrológica (HRU) las cuales son áreas homogéneas en términos de uso de la tierra, clase de suelos y pendiente (van Tol et al., 2020), se utiliza también la dirección de flujo (DIR) proveniente del DEM y la acumulación de flujo (ACC) (Tam et al., 2019).

La base de datos ArcSWAT original SWAT2012.mdb que por defecto se instala en "C:\SWAT\ArcSWAT\Databases", es la base de datos disponible solo para Estados Unidos (EE. UU). La base de datos clase de suelo que utilizamos, corresponde a los datos del suelo mundial de la FAO y modificar la base original de ArcSWAT utilizamos QGIS y SWAT Editor (disponible en: <https://swat.tamu.edu/>) que proporcionan la base de datos del suelo mundial de la FAO dentro de QSWATRef2012.mdb (usersoil). En seguida importamos a la base de datos original SWAT2012.mdb la base usersoil de QSWATRef2012.mdb. En cuanto al uso de la tierra (landuse) no fue necesario adecuar modificar la base de datos original.

En consecuencia, para la simulación de caudales con SWAT, se empleó el método de número de curva para estimar la escorrentía superficial a partir de la precipitación, el método de enrutamiento del agua del canal (variable o método Muskingum) y el método de Hargreaves para estimar la evapotranspiración potencial.

Para el proceso de calibración, Healy & Essaid (2012) menciona que se debe seguir los siguientes pasos: Primero para el proceso de calibración y validación en SWAT es



conveniente determinar los parámetros más sensibles con respecto a las entradas del modelo. La sensibilidad de un parámetro a menudo depende del valor de otros parámetros relacionados, con una desventaja que necesita un gran número de simulaciones. En seguida, se realiza el proceso de calibración.

Para el proceso de calibración, utilizamos la herramienta de auto calibración SWAT - CUP (Calibration and Uncertainty Programs For SWAT) con el algoritmo Sequential Uncertainty Fitting 2 (SUFI - 2). Se tomó en cuenta 16 parámetros y sus rangos respectivos de acuerdo a van Griensven et al., (2006) y Neitsch et al., (2002). Entre los 16 parámetros, 9 gobiernan la respuesta del agua superficial y subterránea en SWAT, y los otros 7 parámetros gobiernan la respuesta de la cuenca (Zhang et al., 2008) (Tabla 4).



generaría cambios significativos en los resultados finales (Perez et al., 2017). En consecuencia, para evaluar la precisión del modelo con datos fuera de la etapa de calibración se pasó a la etapa de validación donde se utilizaron los valores óptimos de los parámetros calibrados. Según Wörner et al., (2019) los criterios de evaluación para la calibración y validación se utiliza la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), coeficiente de determinación (R^2), porcentaje de sesgo (PBIAS), desviación estándar de los datos medios (RSR) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

La idoneidad de los datos de precipitación obtenidos por satélite PERSIANN-CDR y TRMM 3B42 para la simulación de caudales se evaluó utilizando la eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE), la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el sesgo porcentual (PBIAS) establecidas por (Moriasi et al., 2015).

CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR con mediciones pluviométricas

Basados en los resultados de análisis estadístico se puede apreciar que el coeficiente de correlación (r) al ser comparado entre los datos de precipitación observada y PERSIANN-CDR dio un valor mínimo ($r= 0.23$; Macusani) y máximo ($r= 0.50$; Pampahuta) y para el producto TRMM-3B42 los valores mínimos y máximos son de $r= 0.06$ y $r = 0.38$ respectivamente (Tabla 5). Una serie de diagramas de dispersión entre valores de precipitación observada comparado con PERSIANN-CDR (Figura 6) y TRMM-3B42 (Figura 7) revelaron la relación de los productos de precipitación satelital. Los coeficientes de correlación lineal entre las EPBS y los datos de la estación meteorológica son bajos y los valores están sesgados.

En cuanto a error, la RMSE para PERSIANN-CDR dio como resultado valores de error más bajo de 4.41 mm/día para la estación Taraco y más alto de 7.09 mm/día para la estación Macusani, mientras que para TRMM-3B42 el RMSE más bajo fue 5.36 mm/día para la estación Cojata y el más alto 11.33 mm/día para la estación Macusani (Tabla 5).

Las EPBS PERSIANN-CDR al ser evaluados con la NSE se puede apreciar que, para el conjunto de estaciones, varía entre $NSE = -1.84$ y $NSE = 0.17$, siendo el más bajo para la estación Crucero y el más alto para la estación Pampahuta. Para TRMM-3B42 los valores de NSE oscilan entre -6.15 (Macusani) y -0.23 (Huaraya Moho). Según las discreciones de Moriasi et al. (2015) estos resultados serían “no satisfactorios” ($NSE \leq 0.50$). Así también, para PBIAS, los resultados obtenidos de las EPBS PERSIANN-CDR y TRMM 3B42 están fuera del umbral $PBIAS \geq \pm 15$ establecido por Moriasi et al. (2015)

encontrándose una sobre y subestimación de la precipitación por parte de las EPBS (Tabla 5).

Para los valores de aproximación del índice de concordancia (d) para PERSIANN-CDR indica una coincidencia entre 0.43 (Macusani) y 0.68 (Pampahuta), mientras que para TRMM-3B42 una coincidencia entre 0.17 (Apara) y 0.53 (Pampahuta) (Tabla 5).

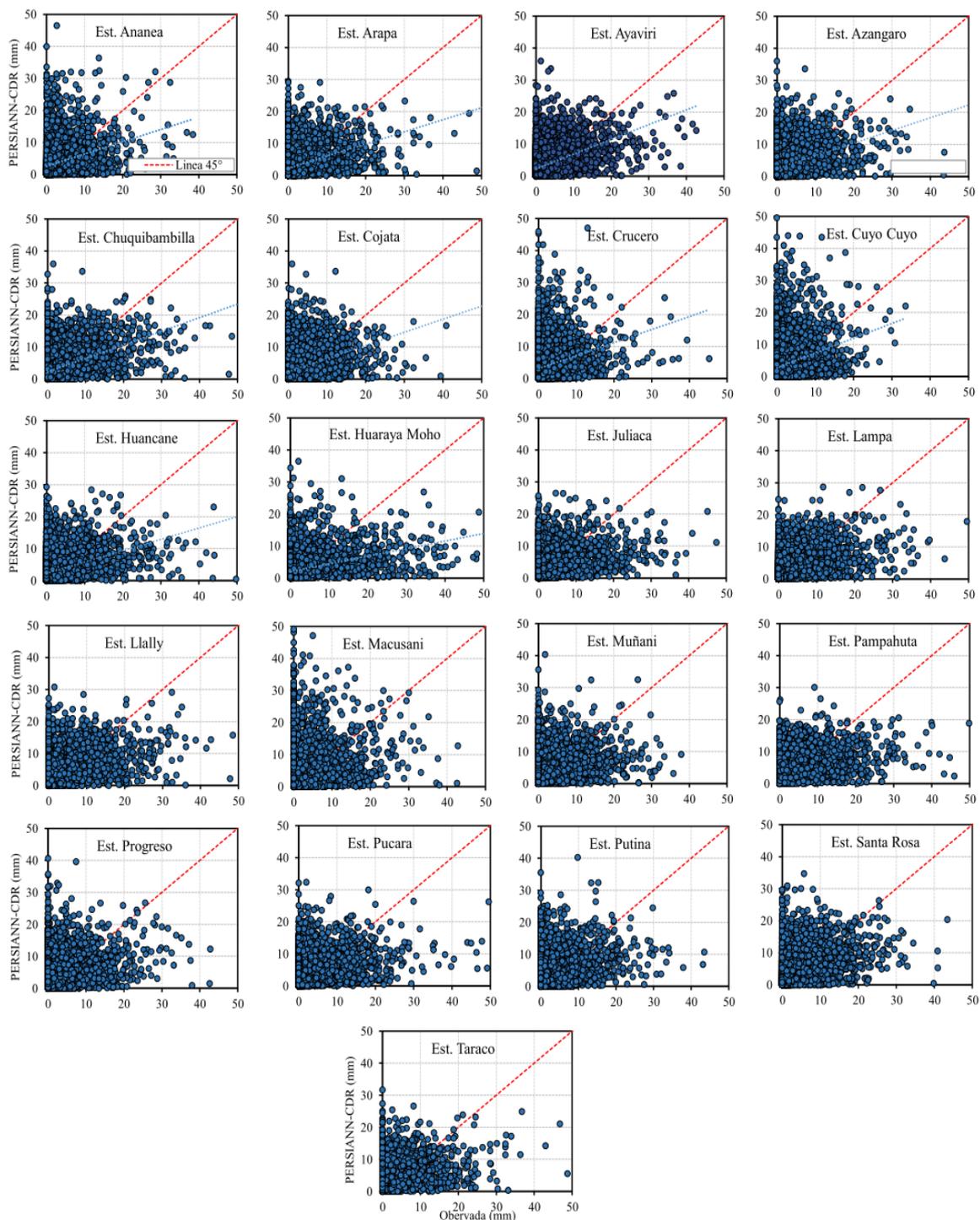


Figura 6. Diagrama de dispersión entre precipitaciones observadas y PERSIANN-CDR.

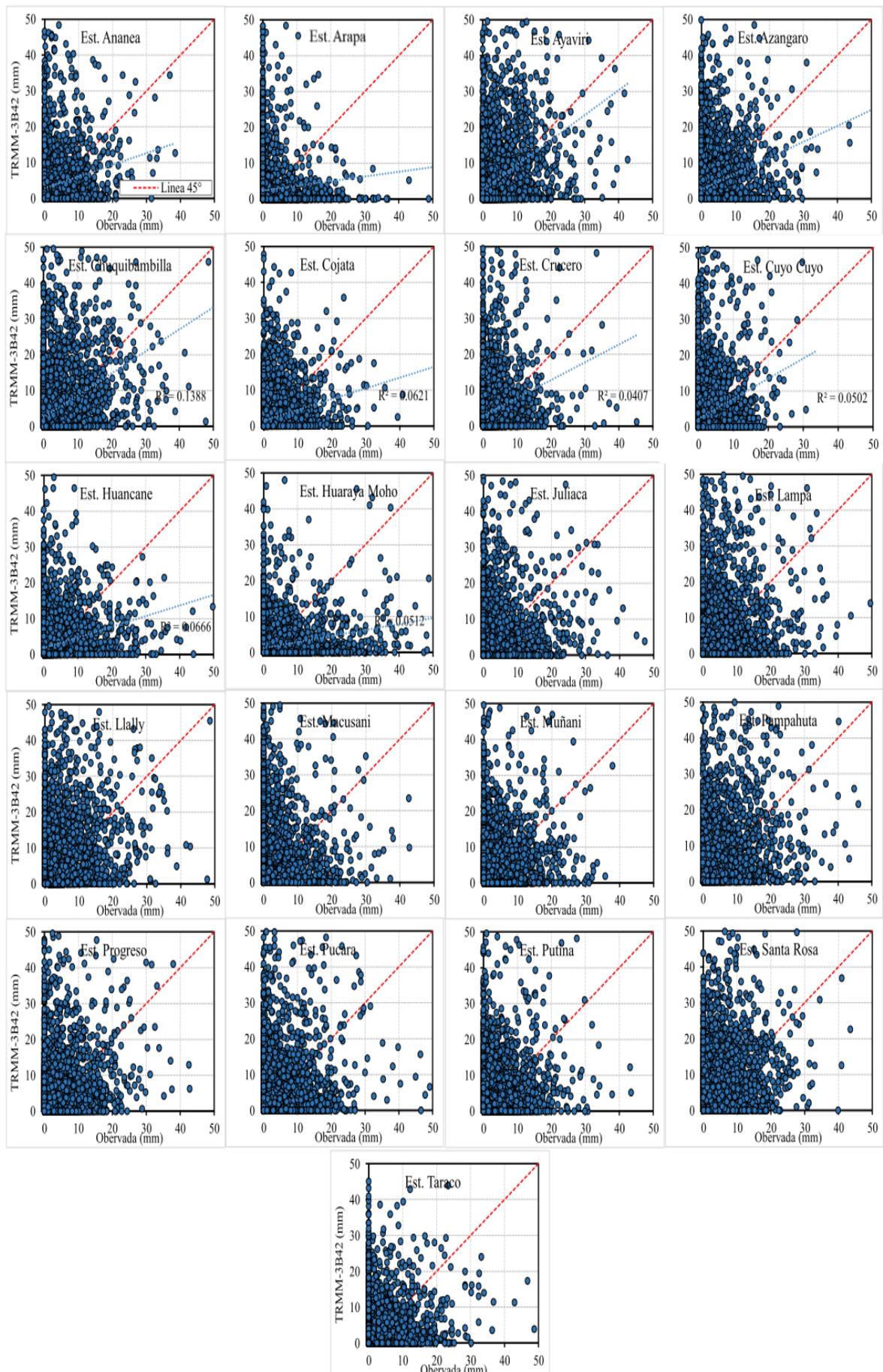


Figura 7. Diagrama de dispersión entre precipitaciones observadas y TRMM-3B42.

Tabla 5

Resultados de indicadores estadísticos.

| Estación | PERSIANN - CDR | | | | | TRMM - 3B42 | | | | |
|----------------|----------------|------|-------|--------|------|-------------|-------|-------|--------|------|
| | r | RMSE | NSE | PBIAS | d | r | RMSE | NSE | PBIAS | d |
| Ananea | 0.31 | 5.16 | -0.90 | 82.40 | 0.52 | 0.19 | 7.11 | -2.61 | 89.90 | 0.38 |
| Arapa | 0.39 | 4.77 | -0.27 | 85.70 | 0.59 | 0.06 | 10.41 | -5.04 | 68.40 | 0.17 |
| Ayaviri | 0.47 | 4.73 | -0.14 | 67.10 | 0.65 | 0.38 | 7.83 | -2.12 | 103.70 | 0.51 |
| Azángaro | 0.38 | 5.01 | -0.41 | 89.20 | 0.58 | 0.26 | 7.56 | -2.22 | 97.90 | 0.42 |
| Chuquibambilla | 0.47 | 4.89 | 0.00 | 46.40 | 0.67 | 0.37 | 7.91 | -1.61 | 78.50 | 0.53 |
| Cojata | 0.37 | 4.87 | -0.52 | 66.80 | 0.58 | 0.25 | 5.36 | -0.84 | 10.60 | 0.48 |
| Crucero | 0.27 | 5.80 | -1.84 | 155.60 | 0.45 | 0.20 | 8.73 | -5.44 | 149.70 | 0.31 |
| Cuyo Cuyo | 0.29 | 5.75 | -1.83 | 105.80 | 0.48 | 0.22 | 8.59 | -5.32 | 87.90 | 0.33 |
| Huancané | 0.39 | 4.92 | -0.18 | 71.00 | 0.59 | 0.26 | 5.98 | -0.74 | 34.50 | 0.48 |
| Huaraya Moho | 0.36 | 5.75 | 0.03 | 16.80 | 0.55 | 0.23 | 6.47 | -0.23 | -28.70 | 0.45 |
| Juliaca | 0.44 | 4.53 | 0.00 | 48.00 | 0.63 | 0.27 | 7.72 | -1.92 | 55.20 | 0.43 |
| Lampa | 0.49 | 4.46 | 0.12 | 28.90 | 0.67 | 0.32 | 8.18 | -1.94 | 60.90 | 0.48 |
| Llally | 0.47 | 4.92 | -0.01 | 49.20 | 0.66 | 0.37 | 8.44 | -1.97 | 92.60 | 0.51 |
| Macusani | 0.23 | 7.09 | -1.80 | 147.00 | 0.43 | 0.13 | 11.33 | -6.15 | 168.40 | 0.24 |
| Muñani | 0.35 | 5.05 | -0.51 | 88.70 | 0.57 | 0.25 | 6.95 | -1.86 | 83.10 | 0.44 |
| Pampahuta | 0.50 | 4.62 | 0.17 | 29.30 | 0.68 | 0.38 | 8.28 | -1.69 | 73.00 | 0.53 |
| Progreso | 0.36 | 5.31 | -0.57 | 99.40 | 0.57 | 0.29 | 7.82 | -2.41 | 110.10 | 0.44 |
| Pucara | 0.44 | 4.83 | -0.01 | 46.60 | 0.64 | 0.32 | 8.18 | -1.88 | 66.30 | 0.48 |
| Putina | 0.39 | 4.87 | -0.47 | 90.30 | 0.59 | 0.27 | 6.85 | -1.91 | 84.70 | 0.45 |
| Santa Rosa | 0.46 | 5.07 | -0.21 | 57.40 | 0.65 | 0.37 | 7.85 | -1.89 | 75.50 | 0.52 |
| Taraco | 0.43 | 4.41 | -0.08 | 64.80 | 0.62 | 0.28 | 5.75 | -0.84 | 43.00 | 0.49 |

4.2. Evaluación de los datos de precipitación estimada por satélite TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR como entrada en la modelación hidrológica

Se consideraron 16 parámetros para la calibración del modelo SWAT. Se realizaron 50, 100, 500 y 1000 iteraciones utilizando la función objetivo Nash-Sutcliffe (NSE). Aunque

es posible utilizar el Error Cuadrático Medio “MSE”, CHI2, bR2, PBIAS, SSQR, eficiencia de Kling-Gupta (KGE), RSR y modificación de NS (MNS), Nash-Sutcliffe (NSE) dio mejores resultados. El número de iteraciones en el cual se alcanzó un mayor NSE fue en la iteración 371 para PERSIANN-CDR de un total de 1000 iteraciones, para TRMM-3B42 fue en la iteración 247 de un total de 500 iteraciones y para los datos observados de precipitación fue en la iteración 16 de un total de 50 iteraciones. Encontramos que cuando se utilizan datos de precipitación observada, el número de iteraciones es menor que cuando se utilizan las EPBS. Los parámetros calibrados se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Parámetros calibrados del modelo SWAT.

| Parámetros | Extensión | Valores | | | | |
|-------------|-----------|---------|------|-----------|------------------|---------------|
| | | Min. | Max. | Observado | PERSIANN- CDR | TRMM- 3B42 |
| CN2 | .mgt | -0.2 | 0.2 | 0.14 | -0.139 | -0.1516 |
| SOL_AWC(..) | .sol | -0.2 | 0.2 | -0.036 | -0.0666 | -0.1796 |
| GW_REVAP | .gw | 0.02 | 0.2 | 0.1226 | 0.18425 | 0.1901 |
| REVAPMN | .gw | 0 | 500 | 225 | 337.75 | 73.50 |
| GWQMN | .gw | 0 | 5000 | 3650 | 4902.50 | 4045 |
| GW_DELAY | .gw | 0 | 50 | 19.50 | 38.725002 | 1.85 |
| ALPHA_BF | .gw | 0 | 1 | 0.21 | 0.3395 | 0.141 |
| RCHRG_DP | .gw | 0 | 1 | 0.91 | 0.0935 | 0.095 |
| CH_K2 | .rte | -0 | 150 | 97.4965 | 111.372429 | 124.648315 |
| SURLAG | .hru | 0 | 10 | 7.30 | 5.645 | 4.87 |
| ESCO | .hru | 0 | 1 | 0.25 | 0.1405 | 0.287 |
| TIMP | .bsn | 0 | 1 | 0.31 | 0.7205 | 0.123 |
| SFTMP | .bsn | 0.01 | 5 | 2.7545 | 0.336845 | 4.61577 |
| SMTMP | .bsn | 0.01 | 5 | 1.1577 | 3.071365 | 1.30241 |
| SMFMX | .bsn | 0.01 | 10 | 3.7063 | 0.994015 | 3.19681 |
| SMFMN | .bsn | 0.01 | 10 | 9.7003 | 3.431575 | 5.41459 |

Los indicadores estadísticos en la etapa de calibración y validación utilizando datos de entrada las EPBS dieron como resultado para PERSIANN-CDR un $r = 0.63$ (calibración) y $r = 0.59$ (validación), mientras que para TRMM-3B42 $r = 0.77$ (calibración) $r = 0.79$ (validación). En términos de error para PERSIANN-CDR un $RMSE = 89.76$ (calibración) y $RMSE = 99.41$ (validación), mientras que para TRMM-3B42 un $RMSE = 99.33$ (calibración) y un $RMSE = 144.49$ (validación). Los hidrogramas de caudales observados y simulados mediante el uso de precipitaciones observadas, PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 se presenta en la Figura 8.

Por otro lado, para PERSIANN-CDR la $NSE = -0.01$ (calibración) y $NSE = -0.47$ (validación), mientras que para TRMM-3B42 $NSE = -0.24$ (calibración) y $NSE = -2.1$ (validación). En cuanto al sesgo, los resultados para PERSIANN-CDR dieron un $PBIAS = 62.3 \%$ (calibración) y un $PBIAS = 89.3 \%$ (validación), mientras que para TRMM-3B42 un $PBIAS = 56.5 \%$ (calibración) y $PBIAS = 123.8 \%$ (validación). Según las discreciones de Moriasi et al. (2015) estos resultados serían “no satisfactorios” cuando se evalúa con NSE ($NSE \leq 0.50$). Así también, para $PBIAS$, los resultados obtenidos de las EPBS PERSIANN-CDR y TRMM 3B42 están fuera del umbral $PBIAS \geq \pm 15$ establecido por Moriasi et al. (2015) encontrándose una sobreestimación de la precipitación por parte de las EPBS (Tabla 7). Las EPBS TRMM-3B42 y PERSIANN-CDR no representan adecuadamente los caudales en la cuenca del río Ramis Perú. Lujano Laura et al., (2015) al utilizar datos de entrada el producto TRMM mensual, obtuvo resultados satisfactorios en la simulación de caudales del río Ramis, llegando a un $NSE = 0.78$ (calibración) y $NSE = 0.75$ (validación), los estudios de Ancco & Tancayllo, (2019) con información pluviométrica recopilada de la cuenca Ramis en la evaluación hidrología se obtuvieron los siguientes resultados $NSE = 0.76$ (calibración) y $NSE = 0.79$ (validación).

Así también, el índice de concordancia (d) dio como resultado para PERSIANN-CDR $d = 0.74$ (calibración) y $d = 0.70$ (validación), mientras que para TRMM-3B42 $d = 0.80$ (calibración) y $d = 0.70$ (validación).

Por otro lado, al utilizar datos de precipitación observada se tuvo un coeficiente de correlación $r = 0.86$ en la etapa de calibración y un $r = 0.87$ en la etapa de validación, un $RMSE = 46.64$ (calibración) y un $RMSE = 41.23$ (validación), una $NSE = 0.73$ (calibración) y $NSE = 0.75$ (validación), un $PBIAS = -15.4$ (calibración) y la

validación 1.7 (validación). Estos resultados son “buenos” según las discreciones de Moriasi et al. (2015) ($0.70 < NSE \leq 0.80$). Así también, para PBIAS, los resultados obtenidos son satisfactorios para etapa de calibración ($\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$) y muy bueno para la etapa de validación ($PBIAS < \pm 5$) (Tabla 7).

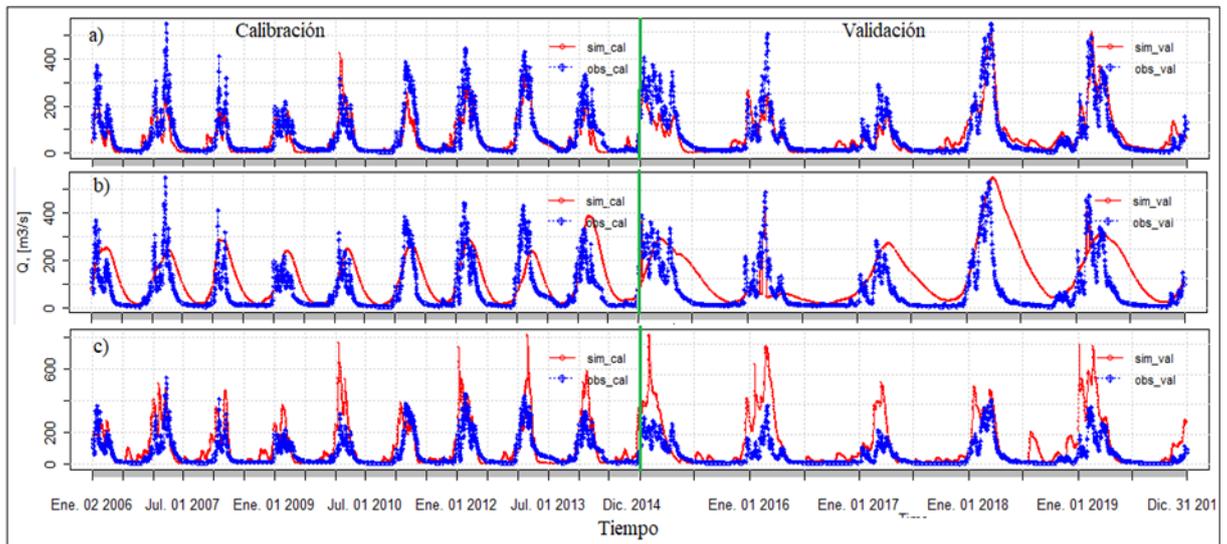


Figura 8. Hidrograma de caudales observados y simulados mediante el uso de a) precipitaciones observadas, b) PERSIANN-CDR, c) TRMM-3B42.

Tabla 7

Indicadores estadísticos para las simulaciones de caudal utilizando diferentes conjuntos de datos de lluvia.

| Indicador estadístico | Observado | | PERSIANN -CDR | | TRMM-3B42 | |
|-----------------------|-------------|------------|---------------|------------|-------------|------------|
| | Calibración | Validación | Calibración | Validación | Calibración | Validación |
| r | 0.86 | 0.87 | 0.63 | 0.59 | 0.77 | 0.79 |
| RMSE | 46.64 | 41.23 | 89.76 | 99.41 | 99.33 | 144.49 |
| NSE | 0.73 | 0.75 | -0.01 | -0.47 | -0.24 | -2.10 |
| PBIAS (%) | -15.40 | 1.70 | 62.30 | 89.30 | 56.50 | 123.80 |
| d | 0.91 | 0.93 | 0.74 | 0.70 | 0.80 | 0.70 |

CONCLUSIONES

Se ha explorado el conjunto de datos provenientes de estimaciones de satélite PERSIANN-CDR y TRMM en la modelación hidrológica. Las principales conclusiones se resumen a continuación:

Al evaluar las estimaciones de precipitaciones diarias basadas en satélite PERSIANN-CDR y TRMM con datos de las estaciones meteorológicas, encontramos que los datos de satélite no brindan precipitaciones confiables sobre la cuenca del río Ramis, mostrando errores altos y valores sesgados.

El uso de las estimaciones de precipitaciones diarias basadas en satélite PERSIANN-CDR y TRMM como entrada en el modelo hidrológico SWAT revelaron que ambos productos no muestran rendimientos adecuados para simular caudales en la cuenca del río Ramis.

RECOMENDACIONES

Las estimaciones de precipitaciones basadas en satélite PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 indican una correlación baja, están sesgadas y errores altos en la zona de estudio, lo que se sugiere un procedimiento de corrección de sesgo para mejorar la calidad de las estimaciones de precipitación y reducir el error de las mismas.

De los resultados de la modelación hidrológica mediante el uso de productos de precipitación satelital PERSIANN-CDR y TRMM-3B42 no se recomienda su uso tal cual se obtiene desde la base de datos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre, R. (2009). *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México* (Universida).
- Ancco, C., & Tancayllo, E. F. (2019). Estudio Hidrológico de la Unidad Hidrográfica del Río Ramis Memoria Final Estudio Hidrológico de la Unidad. *Autoridad Nacional Del Agua., 01*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4716?show=full>
- Ang, R., & Oeurng, C. (2018). Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *Water Science, 32*(1), 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2017.12.002>
- Anjum, M. N., Irfan, M., Waseem, M., Leta, M. K., Niazi, U. M., Rahman, S., Ghanim, A., Mukhtar, M. A., & Nadeem, M. U. (2022). *Semi-Arid Subtropical Climatic Region*.
- Anornu, G. K. D. B. W., Agyare, A. K. A. T. L. I. S. E. D. D. Y. T., & Gyamfi, C. (2022). Groundwater recharge estimation and potential recharge mapping in the Afram Plains of Ghana using SWAT and remote sensing techniques. *Groundwater for Sustainable Development, 17*(6), 100741. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2022.100741>
- Arijaje, T. E., Omotosho, T. V., Akinwumi, S. A., Ometan, O. O., & Fashade, O. O. (2022). Analysis of Seasonal Precipitation Rate in Nigeria Using Dataset from Tropical Rainfall Measuring Mission. *Journal of Physics: Conference Series, 2199*(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2199/1/012029>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. In *Journal of the American Water Resources Association* (Vol. 34, Issue 1, pp. 73–89). <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Avand, M., Kuriqi, A., Khazaei, M., & Ghorbanzadeh, O. (2022). DEM resolution effects on machine learning performance for flood probability mapping. *Journal of Hydro-Environment Research, 40*(June 2021), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.10.002>
- Bal, M., Dandpat, A. K., & Naik, B. (2021). Hydrological modeling with respect to

- impact of land-use and land-cover change on the runoff dynamics in Budhabalanga river basing using ArcGIS and SWAT model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100527>
- Balcázar, L., Bâ, K. M., Delgado, C. D., Quentin, E., & León, S. M. (2019). Modelado de caudales diarios en una cuenca del sur del Ecuador con precipitación y temperatura estimadas por satélite. *Agrociencia*, 53(4), 465–486.
- Cha, Y., Park, S. S., Kim, K., Byeon, M., & Stow, C. A. (2014). *Water Resources Research*. 5375–5377. <https://doi.org/10.1002/2013WR014979.Reply>
- Chen, C., Li, Z., Song, Y., Duan, Z., Mo, K., Wang, Z., & Chen, Q. (2020). Performance of multiple satellite precipitation estimates over a typical arid mountainous area of China: Spatiotemporal patterns and extremes. *Journal of Hydrometeorology*, JHM-D-19-0167.1. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0167.1>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledeteccion ambiental.pdf* (p. 576). <http://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/77/74>
- Escamilla-Rivera, V., Cortina-Villar, S., Vaca, R. A., Golicher, D., Arellano-Monterrosas, J., & Honey-Rosés, J. (2022). Effects of Finer Scale Soil Survey and Land-Use Classification on SWAT Hydrological Modelling Accuracy in Data-Poor Study Areas. *Journal of Water Resource and Protection*, 14(02), 100–125. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2022.142007>
- Fu, Z., Xie, Y., Zhang, Y., Jiang, X., Guo, H., & Wang, S. (2022). Water Resource Availability Assessment Through Hydrological Simulation Under Climate Change in the Huangshui Watershed of the Qinghai–Tibet Plateau. *Frontiers in Earth Science*, 9(January), 1–15. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.755119>
- Fujita, T., de Morais, M. V. B., Dos Santos, V. C., Rudke, A. P., de Eiras, M. M., Xavier, A. C. F., Rafee, S. A. A., Santos, E. B., Martins, L. D., Uvo, C. B., de Souza, R. A. F., de Freitas, E. D., & Martins, J. A. (2022). Simulating Discharge in a Non-Dammed River of Southeastern South America Using SWAT Model. *Water (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/w14030488>
- Galindo G., Espejo O. J., Rubiano J. C., Vergara L. K., C. E. (2014). Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en

- Colombia. V 2.0. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.*, xx.
- Gómez, R. A. (2009). *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México* (Primera ed). Instituto de Geografía UNAM.
- Guijarro, J. A. (2018). Homogeneización de series climáticas con Climatol. *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), D.T. En Islas Baleares, España, 1, 22.*
http://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf
- Gunathilake, M. B., Zamri, M. N. M., Alagiyawanna, T. P., Samarasinghe, J. T., Baddewela, P. K., Babel, M. S., Jha, M. K., & Rathnayake, U. S. (2021). Hydrologic utility of satellite-based and gauge-based gridded precipitation products in the HUAI bang Saiwatershed of northeastern Thailand. *Hydrology, 8*(4).
<https://doi.org/10.3390/hydrology8040165>
- Gutierrez, C. C. (2014). *Hidrologia Basica y Aplicada*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Healy, R. W., & Essaid, H. I. (2012). VS2DI: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE, 55*(4), 1249–1260. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., Gu, G., Nelkin, E. J., Bowman, K. P., Hong, Y., Stocker, E. F., & Wolff, D. B. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology, 8*(1), 38–55.
<https://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Jiménez, R. M. R., Capa, Á. B., & Adelaida Portela, L. (2004). *Meteorología y Climatología Climatología* (FECYT (ed.)). Villena Artes Gráficas.
- Katiraie-Boroujerdy, P. S., Akbari Asanjan, A., Hsu, K. lin, & Sorooshian, S. (2017). Intercomparison of PERSIANN-CDR and TRMM-3B42V7 precipitation estimates at monthly and daily time scales. *Atmospheric Research, 193*(August 2016), 36–49.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.005>
- Keys, L., & Baade, J. (2019). Uncertainty in catchment delineations as a result of digital elevation model choice. *Hydrology, 6*(1), 1–14.

<https://doi.org/10.3390/hydrology6010011>

- Lakew, H. B., Moges, S. A., & Asfaw, D. H. (2017). Hydrological evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in the Upper Blue Nile basin: A case study of Gilgel Abbay. *Hydrology*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology4030039>
- Liang, D., Zuo, Y., Huang, L., Zhao, J., Teng, L., & Yang, F. (2015). Evaluation of the consistency of MODIS land cover product (MCD12Q1) based on Chinese 30 m GlobeLand30 datasets: A case study in Anhui Province, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4), 2519–2541. <https://doi.org/10.3390/ijgi4042519>
- Liu, K. Lou, Li, Y. Z., & Hu, H. W. (2015). Predicting Ratoon rice growth rhythm based on NDVI at key growth stages of main rice. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 75(4), 410–417. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392015000500005>
- Liu, X., Yang, T., Hsu, K., Liu, C., & Sorooshian, S. (2017). Evaluating the streamflow simulation capability of PERSIANN-CDR daily rainfall products in two river basins on the Tibetan Plateau. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 169–181. <https://doi.org/10.5194/hess-21-169-2017>
- Luis, J., y Hourcade, G. (2002). *La meteorología en la españa ilustrada y la obra de Vicente Alcalá Galiano* (G. Ceyde (ed.); Asociación, Issue Segovia 1783).
- Lujano Laura, E., Felipe Obando, O. G., Lujano Laura, A., & Quispe Aragón, J. (2015). Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis Puno Perú. *Revista Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Investigation*, 17(2), 221. <https://doi.org/10.18271/ria.2015.116>
- Marcos Martín, C. (2018). Satélites meteorológicos. *Física Del Caos En La Predicción Meteorológica*, 83–102. <https://doi.org/10.31978/014-18-009-x.07>
- Melgarejo, J., Romero, L., & Ojeda, I. (2013). Aplicaciones Satelitales Para La Meteorología. In *Academia Politécnica Naval*.
- Meza, J. C. (2020). Análisis comparativo de los modelos digitales de elevaciones SRTM y MDE-Ar 2.0 para la identificación de áreas de peligrosidad por inundaciones y anegamientos en un área urbana de llanura. *Geográfica Digital*, 17(33), 44.

- <https://doi.org/10.30972/geo.17334015>
- Mills, G. (2001). Ireland's water budget - Model validation and a greenhouse experiment. *Irish Geography*, 34(2), 124–134. <https://doi.org/10.1080/00750770109555783>
- Monteiro, E. S. V., Fonte, C. C., & de Lima, J. L. M. P. (2018). Analysing the potential of OpenStreetMap data to improve the accuracy of SRTM 30 DEM on derived basin delineation, slope, and drainage networks. *Hydrology*, 5(3), 1–27. <https://doi.org/10.3390/hydrology5030034>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Narsimlu, B., Gosain, A. K., Chahar, B. R., Singh, S. K., & Srivastava, P. K. (2015). SWAT Model Calibration and Uncertainty Analysis for Streamflow Prediction in the Kunwari River Basin, India, Using Sequential Uncertainty Fitting. *Environmental Processes*, 2(1), 79–95. <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0064-8>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., & Srinivasan, R. (2002). Pesticides fate and transport predicted by the Soil and water Assessment Tool (SWAT) Atrazine, Metolachlor and Trifluralin in the Sugar Creek Watershed. *BRC Report*, 3.
- Nguyen, P., Ombadi, M., Sorooshian, S., Hsu, K., AghaKouchak, A., Braithwaite, D., Ashouri, H., & Rose Thorstensen, A. (2018). The PERSIANN family of global satellite precipitation data: A review and evaluation of products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5801–5816. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5801-2018>
- Olaya, Víctor. (2014). *Sistemas de Información Geográfica* (p. 854).
- OMM. (1994). *Datos, Adquisición y proceso de análisis, predicción y aplicaciones, otras* (5ta Edic.).
- OMM. (2019). *Congreso Meteorológico Mundial*.
- Oñorbe, P. (2016). Teledetección en general y aplicaciones en el sector medioambiental. *Teledetección y Sensores Medioambientales*. <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2016//GTs>

2016/14_final.pdf

- Ormeño Villajos, S. (2006). *Teledeteccion Fundamental: Vol. 3a ed* (U. P.- MADRID. (ed.); 3ª Edición).
- Paulhus, J. L. H., & Kohler, M. A. (1952). Monthly weather review. *Journal of the Franklin Institute*, 80(8), 129–133. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080%3C0129:IOMPR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080%3C0129:IOMPR%3E2.0.CO;2)
- Perez Valdivia, C., Cade Menun, B., & Mc Martin, D. W. (2017). Hydrological modeling of the pipestone creek watershed using the Soil Water Assessment Tool (SWAT): Assessing impacts of wetland drainage on hydrology. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 14(October), 109–129. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.10.004>
- Pino-Vargas, E., Chávarri-Velarde, E., Ingol-Blanco, E., Mejía, F., Cruz, A., & Vera, A. (2022). Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. *Hydrology*, 9(1), 1–36. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010010>
- Pulighe, G., Lupia, F., Chen, H., & Yin, H. (2021). Modeling climate change impacts on water balance of a mediterranean watershed using swat+. *Hydrology*, 8(4), 1–14. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040157>
- Roa Lobo, J., & Kamp, U. (2008). Modelos de Elevación Digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. *Revista Geografica Venezolana*, 49(1), 11–42.
- Rosiek, S., & Batlles, F. J. (2004). *Adquisición y Transmisión de Datos desde Estaciones Meteorológicas Remotas*. 1–9.
- Saber, M., & Yilmaz, K. K. (2018). Evaluation and bias correction of satellite-based rainfall estimates for modelling flash floods over the Mediterranean region: Application to Karpuz River Basin, Turkey. *Water (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/w10050657>
- Santos, W. dos, Perini, A., & Santos, R. (2018). Modelagem aplicada na estimativa de vazão de uma bacia hidrográfica no sudoeste de goiás, cerrado brasileiro. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 10–27.

<https://doi.org/http://doi.org/10.14393/RCG238557899>

- Siev, S., Paringit, E. C., Yoshimura, C., & Hul, S. (2016). Seasonal changes in the inundation area and water volume of the Tonle Sap River and its floodplain. *Hydrology*, 3(4), 1–12. <https://doi.org/10.3390/hydrology3040033>
- Sliwi, D. (2022). *Geostatistical Resampling of LiDAR-Derived DEM in Wide Resolution Range for Modelling in SWAT: A Case Study of Zgłowi aczka River (Poland)*.
- Sproles, E. A., Mullen, A., Hendriks, J., Gatebe, C., & Taylor, S. (2020). Autonomous aerial vehicles (AAVS) as a tool for improving the spatial resolution of snow albedo measurements in mountainous regions. *Hydrology*, 7(3), 1–16. <https://doi.org/10.3390/hydrology7030041>
- Sutton, J. R. P., Jakobsen, A., Lanyon, K., & Lakshmi, V. (2022). Comparing Precipitation during Typhoons in the Western North Pacific Using Satellite and In Situ Observations. *Remote Sensing*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/rs14040877>
- Tam, T. H., Abd Rahman, M. Z., Harun, S., Hanapi, M. N., & Kaoje, I. U. (2019). Application of satellite rainfall products for flood inundation modelling in Kelantan River Basin, Malaysia. *Hydrology*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY6040095>
- Tan, M. L. (2019). Assessment of TRMM product for precipitation extreme measurement over the Muda River Basin, Malaysia. *HydroResearch*, 2, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.11.004>
- Tan, M. L., & Santo, H. (2018). Comparison of GPM IMERG, TMPA 3B42 and PERSIANN-CDR satellite precipitation products over Malaysia. *Atmospheric Research*, 202(September 2017), 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.006>
- Timsina, J., Boote, K. J., & Duffield, S. (2007). Evaluating the CROPGRO soybean model for predicting impacts of insect defoliation and depodding. *Agronomy Journal*, 99(1), 148–157. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0338>
- Tobin, K. J., & Bennett, M. E. (2009). Using SWAT to model streamflow in two river basins with ground and satellite precipitation data. *Journal of the American Water*

- Resources Association*, 45(1), 253–271. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00276.x>
- Torres-bejarano, F., Coba, J. P., Cuevas, C. R., León, H. R., & Rodelo, R. C. (2016). *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería Guájaro, Colombia*. 32(3), 163–172.
- Tripathi, G., Parida, B. R., & Pandey, A. C. (2019). Spatio-temporal rainfall variability and flood prognosis analysis using satellite data over North Bihar during the August 2017 flood event. *Hydrology*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/hydrology6020038>
- Umugwaneza, A., Chen, X., Liu, T., Mind'je, R., Uwineza, A., Kayumba, P. M., Uwamahoro, S., Umuhoza, J., Gasirabo, A., & Maniraho, A. P. (2022). Integrating a GIS-based approach and a SWAT model to identify potential suitable sites for rainwater harvesting in Rwanda. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 00(0), 1–18. <https://doi.org/10.2166/aqua.2022.111>
- Valdés-Pineda, R., Valdés, J. B., Wi, S., Serrat-Capdevila, A., & Roy, T. (2021). Improving operational short-to medium-range (Sr2mr) streamflow forecasts in the upper zambezi basin and its sub-basins using variational ensemble forecasting. *Hydrology*, 8(4), 1–25. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040188>
- van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., & Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324(1–4), 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008>
- van Tol, J., van Zijl, G., & Julich, S. (2020). Importance of detailed soil information for hydrological modelling in an urbanized environment. *Hydrology*, 7(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY7020034>
- Vargas, G., Neira, O., Arango, R., & Fernando, D. (2013). Métodos de segmentación de nubes en imágenes satelitales Cloud segmentation methods applied to satellite images. *Tecnura*, 17(36), 96–110.
- Vu, T. T., Li, L., & Jun, K. S. (2018). Evaluation of multi-satellite precipitation products for streamflow simulations: A case study for the Han River Basin in the Korean Peninsula, East Asia. *Water (Switzerland)*, 10(5).

- <https://doi.org/10.3390/w10050642>
- W. Gassman, P., Jeong, J., Boulange, J., Narasimhan, B., Kato, T., Somura, H., Watanabe, H., Eguchi, S., Cui, Y., Sakaguchi, A., Hoang Tu, L., & Jiang, R. (2021). Simulation of rice paddy systems in SWAT: A review of previous applications and proposed SWAT+ rice paddy module. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14(6), 1–24.
<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221501.7147>
- Wiwoho, B. S., Astuti, I. S., Alfarizi, I. A. G., & Suchahyo, H. R. (2021). Validation of three daily satellite rainfall products in a humid tropic watershed, brantas, indonesia: Implications to land characteristics and hydrological modelling. *Hydrology*, 8(4).
<https://doi.org/10.3390/hydrology8040154>
- Wörner, V., Kreye, P., & Meon, G. (2019). Effects of bias-correcting climate model data on the projection of future changes in high flows. *Hydrology*, 6(2).
<https://doi.org/10.3390/hydrology6020046>
- Yu, M., Chen, X., Li, L., Bao, A., & de la Paix, M. J. (2011). Streamflow Simulation by SWAT Using Different Precipitation Sources in Large Arid Basins with Scarce Raingages. *Water Resources Management*, 25(11), 2669–2681.
<https://doi.org/10.1007/s11269-011-9832-z>
- Zhang, X., Srinivasan, R., Zhao, K., & Van Liew, M. (2008). Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, 20 August 2008.
<https://doi.org/10.1002/hyp>
- Zhong, R., Chen, X., Lai, C., Wang, Z., Lian, Y., Yu, H., & Wu, X. (2019). Drought monitoring utility of satellite-based precipitation products across mainland China. *Journal of Hydrology*, 568(October 2018), 343–359.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.072>

ANEXOS

Anexo 1. Código CLIMATOL.

```
library(climatol)
```

```
setwd("")
```

```
View(daily2climatol)
```

```
daily2climatol(stfile = "stations.txt",stcol = 1:6,datcol = c(1:3,4),varcli = "pp",anyi =  
2003,anyf = 2019,mindat = 365,sep = ',',dec = '.',na.strings = 'NA',header = TRUE)
```

```
homogen("pp",anyi = 2003,anyf = 2019,expl = TRUE)
```

```
dd2m(varcli = "pp",2003,2019,valm = 1)
```

```
homogen("pp-m",2003,2019,expl = TRUE)
```

```
homogen("pp-m",2003,2019,dz.min = -5,dz.max = 6,snht1 = 11,snht2 = 13,std =  
2,cutlev = 0.7,vmin = 0)
```

```
homogen("pp",2003,2019,dz.min = -8,dz.max = 18,vmin = 0,metad = TRUE)
```

```
load("pp_2003-2019.rda")
```

```
View(est.c)
```

```
dahstat("pp",2003,2019,stat = 'series')
```

Anexo 2. Código descarga precipitaciones PERSIANN-CDR (Google Earth Engine).

```
var chirps = ee.ImageCollection('NOAA/PERSIANN-CDR -CDR')

    .filterDate(ee.Date('2013-01-01'),ee.Date('2021-12-31'))

var est = ee.Geometry.Point([latitud,longitud]);

Map.addLayer(est,{ color:'ffffff' },'Estación')

var TS1 =Chart.image.series(chirps, est, ee.Reducer.mean(), 1000, 'system:time_start')

    .setOptions({

        title: 'Serie de Tiempo Estación ',

        vAxis: {title: 'Precipitación (mm)'},

    });

print(TS1);
```

Anexo 3. *Código descarga precipitaciones TRMM-3B42 (Google Earth Engine).*

```
var TRMM-3B42 = ee.ImageCollection("TRMM-3B42/3B42"),

    bait = ee.FeatureCollection("users/TABLE");

var startDate = ee.Date('2003-01-01');

var endDate = ee.Date('2019-12-31');

var pcp = TRMM-3B42.select('precipitation').filterDate(startDate, endDate);

var nDays = ee.Number(endDate.difference(startDate, 'day'));

var daysList = ee.List.sequence(0, nDays.subtract(1));

var pcpDayList = daysList.map(function(dayN){

    var t1 = startDate.advance(ee.Number(dayN), 'day');

    var t2 = t1.advance(1, 'day');

    var dailySum = pcp.filterDate(t1, t2).sum();

    var nBands = dailySum.bandNames().size();

    return dailySum

    .set({

        'system:time_start': t1.millis(),

        'nBands': nBands

    });

});

print('Day 0:', ee.Image(pcpDayList.get(0)).date());

print('Day 1:', ee.Image(pcpDayList.get(1)).date());

print('Day 2:', ee.Image(pcpDayList.get(2)).date());

var pcpDayCol = ee.ImageCollection.fromImages(pcpDayList)
```

```
.filter(ee.Filter.gt('nBands', 0));

print('n images pcp:', pcp.size());

print('n images pcpDayCol:', pcpDayCol.size());

print(bait.select([]));

bait.select([]).evaluate(function (featureCollection)

{

featureCollection.features.forEach(function (feature)

{

print(ui.Chart.image.series(

cpDayCol.limit(50),ee.Geometry(feature.geometry),ee.Reducer.mean(),10000).setOptions({

title: 'Precipitation time series ' + feature.id + ' ('+ feature.geometry.coordinates+)',

hAxis: {title: 'Year'},

vAxis:{title:'mm/hour'}

}));

});

});

Map.addLayer(bait);

Map.centerObject(bait);
```

Anexo 4. Gráfico de reconstrucción de series completas.

